

Reizschwellenunterschiede
und Druckschmerzgrenzen an der Haut
des distalen Unterschenkels als Grundlage
einer optimalen Gestaltung
alpiner Skischuhschäfte

Peter Ruckdeschel

Disbui. München

1988

Aus der Staatlichen Orthopädischen Klinik der Universität München

Vorstand: Prof. Dr. med. H. J. Refior

**Reizschwellenunterschiede und Druckschmerzgrenzen an der
Haut des distalen Unterschenkels als Grundlage einer optimalen
Gestaltung alpiner Skischuhschäfte**

Dissertation

zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin

an der medizinischen Fakultät der

Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Peter Ruckdeschel

aus

Hof/Saale

Jahr

1987

**Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München**

Berichterstatter: Prof. Dr. med. B. Rosemeyer

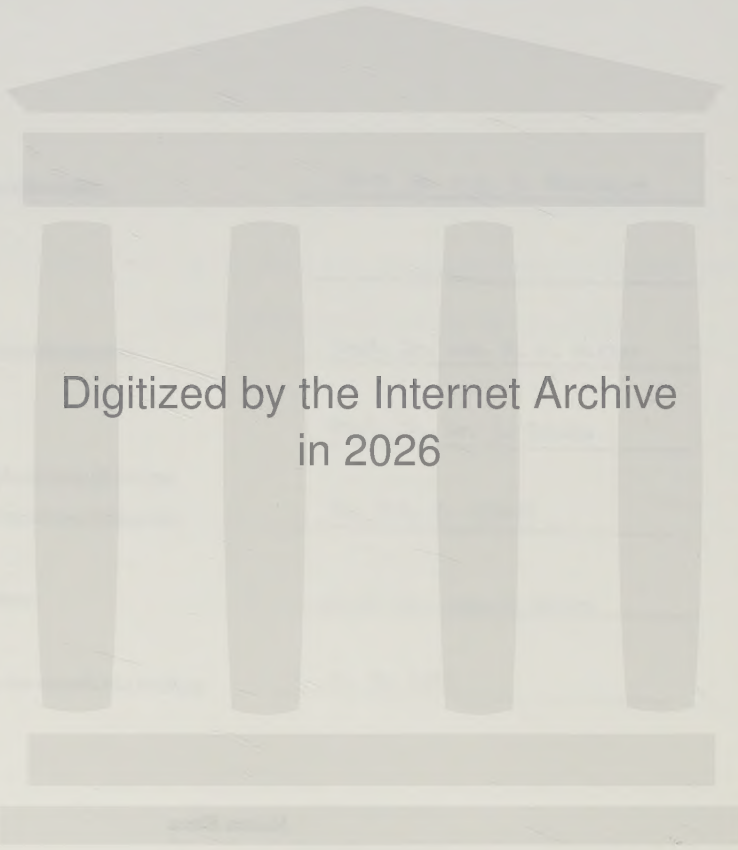
Mitberichterstatter: Prof. Dr. med. H. J. Refior

Prof. Dr. Dr. H. Goerke

Mitbetreuung durch den
promovierten Mitarbeiter: Dr. med. P. Schaff

Dekan: Prof. Dr. med. W. Spann

Tag der mündlichen Prüfung: 25. 2. 1988



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555421_0029

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einführung	1
1.1. Verletzungszahlen beim alpinen Skisport	1
1.2. Aktivitäten des IAS	1
1.3. Bedeutung des Stiefels für die Fahrsicherheit	2
1.3.1. Stiefelsohle	2
1.3.2. Schaftbereich	2
1.4. Druckentwicklung im Stiefelschaft	3
1.5. Zweck der vorliegenden Untersuchung	4
2. Neurophysiologische Grundlagen	5
2.1. Periphere Schmerzperzeption	5
2.1.1. Schmerzformen	5
2.1.2. Schmerztheorien	5
2.1.3. Neurophysiologie der Schmerzrezeptoren	6
2.1.4. Schmerzstoffe	6
2.1.5. Afferenzen	7
2.1.6. Erst- und Zweitschmerz	7
2.2. Impulsverarbeitung im Rückenmark und aufsteigende Bahnen	8
2.2.1. Rückenmarkshinterhorn	8
2.2.1.1. Schmerzverdeckung	8
2.2.1.2. Übertragener Schmerz	8
2.2.2. Aufsteigende Bahnen	9
2.2.2.1. Tractus neo-spinothalamicus	9
2.2.2.2. Tractus paläo-spinothalamicus	9
2.3. Formatio reticularis	10
2.4. Hirnrinde	10
2.5. Zusammenfassung	10
3. Psychophysikalische Grundlagen	11
3.1. Begriffsbestimmung	11
3.2. Psychophysikalische Theorie	11
3.2.1. Der Begriff der Schwelle	11
3.2.1.1. Absolutschwelle	11

	Seite
3.2.1.2. Unterschiedsschwelle	12
3.2.2. Das psychophysikalische Grundgesetz	12
3.2.2.1. Weber'sches Gesetz	12
3.2.2.2. Fechner'sches Gesetz	13
3.2.2.3. Kritische Punkte am Weber-Fechner'schen Gesetz	13
3.3. Methodik der klassischen Psychophysik	14
3.3.1. Grundlagen	14
3.3.2. Methode der konstanten Reize	14
3.3.3. Grenzmethode	15
3.3.3.1. Treppmethode	15
3.3.4. Einstellungsmethode	16
3.3.5. Fehlerquellen	16
3.3.5.1. Räumlicher Fehler	16
3.3.5.2. Zeitlicher Fehler	17
3.3.5.3. Systematische Fehlerquellen der Grenzmethode	17
3.3.5.3.1. Gewöhnungsfehler	17
3.3.5.3.2. Erwartungsfehler	17
3.3.5.3.3. Möglichkeiten zur Vermeidung	18
4. Entwicklung des Versuchsaufbaus	19
4.1. Bereits vorhandener Versuchsaufbau	19
4.1.1. Vorteile des Meßsystems	19
4.1.2. Nachteile des Meßsystems	19
4.2. Neu entwickelte Versuchsanordnung	20
4.2.1. Vorteile des neuen Meßsystems	20
4.2.2. Nachteile des neuen Meßsystems	20
5. Versuchsaufbau	21
6. Auswahl der Versuchspersonen	24
6.1. Medizinische Auswahlkriterien	24
6.2. Alter	24
6.3. Fahrkönnen	24

	Seite
7. Festlegung der Meßpunkte	25
8. Versuchsdurchführung	26
9. Ergänzende Messungen	28
9.1. Follow up-Untersuchungen	28
9.1.1. Ziel des Versuchs	28
9.1.2. Aufbau und Durchführung	28
9.2. Bestimmung der Unterschiedsschwellen für Druck am Unterschenkel	28
9.2.1. Ziel der Untersuchung	28
9.2.2. Aufbau und Durchführung	29
9.3. Bestimmung der Schwelle für Druckschmerz bei erniedrigter Hauttemperatur	29
9.3.1. Ziel des Versuchs	29
9.3.2. Aufbau und Durchführung	29
9.4. Schmerzschwellenbestimmung mit Stempelflächen verschiedener Größe	30
9.4.1. Ziel der Untersuchung	30
9.4.2. Aufbau und Durchführung	30
9.5. Vergleichende Untersuchungen mit Universalprüfmaschine und Ringkraftmesser	31
9.5.1. Ziel der Untersuchung	31
9.5.2. Aufbau und Durchführung	31
10. Auswertung und Darstellung der Ergebnisse	32
10.1. Auswertung	32
10.1.1. Auswertung der Druckverlaufskurven	32
10.1.1.1. Hauptversuch	32
10.1.1.2. Unterschiedsschwellenbestimmung	34
10.1.2. Auswertung der mittels Ringkraftmesser erhaltenen Ergebnisse	34
10.2. Statistische Auswertung	35
10.2.1. Einzelmesswerte	35
10.2.2. Test nach David, Pearson und Stephens	35
10.2.3. F-Test	36
10.2.4. T-Test für unabhängige Stichproben	36
10.2.5. T-Test für abhängige Stichproben	37
10.2.6. Friedman-Test	37
10.2.7. Wilcoxon-Wilcox-Test	38
10.2.8. Berechnung von Regressionskoeffizienten	38

	Seite
10.2.9. Berechnung des emp. linearen Korrelationskoeffizienten	39
10.2.10. Ein-Stichproben-T-Test für den Korrelationskoeff.	39
10.3. Ergebnisdarstellung	40
10.3.1. Streuung der Einzelmeßwerte	40
10.3.2. Durchschnittswerte für Männer- und Frauengruppe	41
10.3.3. Aufschlüsselung nach Meßbereichen	43
10.3.4. Schmerzschwelle bei erniedrigter Hauttemperatur	45
10.3.5. Verschiedene Druckstempelflächen	47
10.3.6. Follow-up Untersuchung	48
10.3.7. Vergleich Prüfmaschine-Ringkraftmesser	49
10.3.8. Bestimmung der Unterschiedsschwellen für Druck	50
11. Diskussion	52
11.1. Variabilität der Meßergebnisse	52
11.1.1. Intraindividuelle Variabilität	52
11.1.2. Interindividuelle Variabilität	53
11.1.3. Mögliche Ursachen der hohen Streuung	54
11.2. Räumliche Unterschiede der Schmerzempfindlichkeit am Unterschenkel	56
11.3. Geschlechtsspezifische Unterschiede der Schmerzschwellenhöhe	58
11.4. Veränderung der Schmerzschwelle bei erniedrigter Hauttemperatur	59
11.5. Größe der Auflagefläche	60
11.6. Unterschiedsschwellen	61
11.7. Verwendbarkeit der Meßergebnisse für Anforderungen an die Stiefelkonstruktion	62
12. Zusammenfassung	64
13. Anhang	66
13.1. Tabellen	66
13.2. Literaturverzeichnis	74

1. Einführung

1.1. Verletzungszahlen beim alpinen Skisport

Der alpine Skilauf hat sich im Laufe unseres Jahrhunderts vom Sport einiger weniger Individualisten zur weltweiten Massenbewegung entwickelt. Die Zahl derjenigen, die alljährlich alpinen Skisport betreiben, wird allein in Deutschland auf ca. 2,5 Millionen geschätzt. Dazu kommen noch etwa 2 Millionen sogenannte Gelegenheitskifahrer, die nicht in jedem Winter skilaufen(29).

Der Skisport ist aber nicht nur eine der beliebtesten, sondern auch eine der unfallträchtigsten Sportarten. Die Unfallrate schwankt in den Statistiken zwischen 1,4 und 8 Verletzten pro 1000 Skifahrer(2,4,5,8,12,18,36,38,65).

Dieser Umstand führte in den vergangenen Dekaden zu Aktivitäten in zwei Richtungen :

1. Um eine möglichst schnelle und wirksame medizinische Versorgung der Verunglückten zu gewährleisten, wurden Maßnahmen zur Verbesserung der Pistenrettung ergriffen. Vor allem die organisierte Hubschrauberrettung ermöglicht heute eine früher nie für möglich gehaltene Geschwindigkeit beim Transport schwerer verletzter Skifahrer direkt von der Piste zur Akutversorgung in auf Traumatologie spezialisierte Zentren(33).
2. Zur Verminderung der Unfallhäufigkeit wurden Maßnahmen der Prävention ergriffen. Neben einer Optimierung der Ausbildung der Skifahrer und vermehrter Aufklärung über die Gefahren lag und liegt der Schwerpunkt der Aktivitäten hierbei in der Verbesserung und sicherheitstechnischen Weiterentwicklung der Skiausrüstung, die vor allem bei Skiunfällen von Anfängern und Kindern als Unfallursache eine wichtige Rolle spielt (27).

1.2. Aktivitäten des IAS

Richtungsweisend auf dem Weg der Unfallverhütung ist der Internationale Arbeitskreis Sicherheit beim Skilauf e.V. (IAS), eine 1967 in München gegründete private Vereinigung von Ärzten, Technikern, Ingenieuren und Naturwissenschaftlern mit dem gemeinsamen Interesse am Skisport, deren Ziel es ist, die Verletzungsgefahr beim alpinen Skisport durch Forschungen über die biomechanischen Belastungen des



menschlichen Körpers beim Skilaufen und Förderung der Umsetzung der Ergebnisse in praktische technische Präventivmaßnahmen zu verringern (1).

Die vom IAS in Zusammenarbeit mit dem TÜV Bayern seit 1969 erstellten Richtlinien zur Bindungskonstruktion und Bindungseinstellung förderten die Entwicklung und Verbreitung der genormten, in zwei Ebenen auslösenden Sicherheitsbindung, die heute das wohl wichtigste Sicherheitselement in der Ausrüstung des Skiläufers darstellt.

1.3. Bedeutung des Skistiefels für die Fahrsicherheit

1.3.1. Stiefelsohle

Da die auf die Bindung einwirkenden Kräfte für die Auslösung entscheidend sind, kommt dem Skistiefel, über den die Kraftübertragung vom Unterschenkel des Skifahrers auf die Bindung und den Ski erfolgt, für eine einwandfreie Bindungsfunktion eine wichtige Rolle zu.

Aus diesem Grund wurde die DIN-Norm 7880 (10) entwickelt, in der die Anschlußbereiche der Skischuhsohle an die Bindung, die Ausführung der Standfläche, die Höhe im Fersenbereich, eine Markierung der Sohle beidseits der Fußmitte als Bezugspunkt für die Bindungsmontage und der Wert des Reibungskoeffizienten für den Gleitbereich der Sohle gegenüber Teflon festgelegt wurden. Die Forderungen der DIN-Norm beziehen sich also nur auf die Skistiefelsohle, während die übrigen Konstruktionselemente des Stiefels unberücksichtigt bleiben.

1.3.2. Schaftbereich

Aber auch die Gestaltung des Stiefelschaftes, vor allem die eingebaute Vorlage sowie die Schafthöhe, hat Einfluß auf Bindungsauslösung und Verletzungsgefahr.

Der seit Mitte der siebziger Jahre zu verzeichnende Rückgang des Anteils der Achillessehnenrupturen und Sprunggelenksverletzungen an den Skiverletzungen wird auf das Aufkommen der hochschaftigen Skistiefel zurückgeführt (45,62), die durch ihre Schaftsteifigkeit eine zur Gefährdung von Sprunggelenk oder Sehne führende Dorsalflexion des Fußes kaum mehr zulassen(3).

Andererseits werden durch die steifen Stiefelschäfte häufig Druckstellen oder Osttiden an der vorderen distalen Tibiakante hervorgerufen und bei starken Hebelwirkungen können über dem oberen Schuhrand

Unterschenkelfrakturen, sog. Schuhrandbrüche, entstehen (49). Eine hohe Schaftsteifigkeit behindert zudem den für die moderne Fahrtechnik nötigen flüssigen Ablauf der Vorlagebewegung, was besonders bei A- und L-Fahrern häufig zu beobachten ist, deren zu statische Fahrweise durch viel zu kleine Winkelwege im Sprunggelenk gekennzeichnet ist (28).

In der 1981 vom IAS herausgegebenen Richtlinie 150 zur Stiefelkonstruktion (34), die den biomechanischen Erfordernissen an den Skistiefel Rechnung tragen sollte, wird daher gefordert, daß der Stiefel die zur Bindungsauslösung führenden Kräfte übertragen muß, ohne daß Grenzwerte auftreten, die zur Gefährdung von Unterschenkel oder Sprunggelenk führen können. Die Sperrstellung des Sprunggelenks von etwa 45° darf nur mit einem Biegemoment von etwa 200 Nm, dem Mindestbruchmoment für einen mittleren Knochendurchmesser der Tibia, erreichbar sein, wobei ein ausreichender Winkelweg zwischen Schaftausgangsstellung und der Schaftstellung beim Biegemoment von 200 Nm eingehalten werden muß, um eine zu große Schaftsteifigkeit zu vermeiden, die die Vorlagebewegung beim Fahren einschränken könnte. Als Mindestwert für den Winkelweg werden 20° genannt.

1.4. Druckentwicklung im Stiefelschaft

Durch die Entwicklung eines neuen Meßsystems wurde es möglich, den Einfluß der Skischuhgestaltung auf die Belastungen des menschlichen Beines durch Bestimmung der Druckverteilung im Skischuhschaft zwischen dem Unterschenkel des Skifahrers und der Zunge des Skischuhs zu untersuchen.

Die Ergebnisse dieser Messungen zeigen sehr unterschiedliche Druckverteilungen im Stiefelschaft in Abhängigkeit vom jeweiligen Stiefelmodell, mit Druckspitzen bis 30 N/cm^2 , die ebenfalls, abhängig vom Konstruktionstyp des Schuhs, unterschiedliche Lokalisationen aufweisen (50).

Andererseits besteht kaum ein Unterschied in der Höhe des Druckmaximums zwischen Herrentiefeln und Modellen, die als Damentiefel ausgewiesen sind (51).

Hinsichtlich der Druckentwicklung im Stiefel wurde daraus die Forderung abgeleitet, daß die maximale Druckentwicklung im Schaftbereich nicht die für das 95. Perzentil gültige individuelle Druckschmerzgrenze im Winkelbereich zwischen 0° und 35° überschreiten darf, um die für das Skifahren notwendige Dorsalflexion im Sprunggelenk zu ermöglichen, und daß eine eventuelle größere Schmerzempfindlichkeit der Frauen für Druckreize am Unterschenkel bei der Klassifizierung der Stiefel berücksichtigt werden sollte (26).

Um diese Forderungen zu konkretisieren, muß untersucht werden, bei welchen Druckwerten die Wahrnehmungsgrenze für Schmerz am Unterschenkel erreicht bzw. überschritten wird, ob die Schmerzschwelle

ein konstanter, auch interindividuell relativ eng begrenzter Wert ist, und welche Einflußgrößen gegebenenfalls Veränderungen der Schwelle hervorrufen können.

1.5. Zweck der vorliegenden Untersuchung

In der vorliegenden Arbeit sollte untersucht werden, ob die Druckschmerzschwelle am Unterschenkel größenordnungsmäßig mit den von Schaff gemessenen Druckwerten korreliert, und ob ihre intra- und interindividuelle Streuung es möglich macht, eine sinnvolle Obergrenze der im Stiefel erlaubten Druckwerte für ein hinreichend großes Signifikanzniveau festzulegen, um durch Aufnahme dieser Werte in eine neue IAS-Richtlinie zur Stiefelkonstruktion eine Verbesserung der Konstruktion des Skischuhschaftes und damit eine weitere Verminderung des Verletzungsrisikos im alpinen Skisport zu bewirken.

Die Ziele der vorliegenden Arbeit waren im Einzelnen :

1. Eine Untersuchung der Bedingungen der Druckschmerzwahrnehmung am menschlichen Unterschenkel, insbesondere die Untersuchung geschlechtsspezifischer Unterschiede.
2. Die quantitative Bestimmung der Schmerzschwelle und Untersuchung ihrer zeitlichen und individuellen Schwankungen.
3. Die Erstellung einer Topographie der Schmerzempfindlichkeit an der Vorderseite des distalen Unterschenkels.

2. Neurophysiologische Grundlagen

2.1. Periphere Schmerzperzeption

2.1.1. Schmerzformen

Der Schmerz lässt sich nach Qualität und Entstehungsort klassifizieren. Man unterscheidet zwischen somatischem und visceralem Schmerz.

Der somatische Schmerz unterteilt sich in den Oberflächenschmerz, dessen Entstehungsort die Haut ist, und den Tiefenschmerz, der z. B. in Muskeln und Gelenken entsteht. Der Oberflächenschmerz besitzt hellen, stechenden Charakter, ist relativ scharf begrenzt und ruft meist prompt Fluchtreflexe hervor.

Der Tiefenschmerz dagegen ist durch affektive und vegetative Komponenten charakterisiert. Er ist stark unlustbetont, von Krankheitsgefühlen begleitet und löst vegetative Reaktionen wie Übelkeit, Schweißausbruch, Blutdruckabfall aus(17).

Der viscerale Schmerz ähnelt im Charakter dem Tiefenschmerz, auch er ist von dumpfem Charakter und von vegetativen Reaktionen begleitet (40).

2.1.2. Schmerztheorien

Die Existenz spezifischer Schmerzrezeptoren war lange umstritten. Zwar hatte schon v. Frey (1894) vier spezifische Empfindungsqualitäten der Haut postuliert: Berührung, Wärme, Kälte und Schmerz, mit jeweils verschiedenen Rezeptoren und speziellen Projektionssystemen zum Gehirn (15). Als Nozizeptoren sah er die freien Nervenendigungen der Haut an.

Dieser Spezifitätstheorie v. Frey's setzte A. Goldscheider seine Mustertheorie entgegen. Ausgehend von der Beobachtung, daß offenbar praktisch alle Arten von Reizen, seien sie nun mechanischer, thermischer oder chemischer Natur, die Empfindung Schmerz auslösen können, wenn sie eine bestimmte Intensität übersteigen, kam er zu der Theorie, die Schmerzentstehung beruhe auf der zentralen Summation spezieller Impulsmuster, die in den afferenten Nervenfasern verschiedenster, intensiv und gleichzeitig erregter unspezifischer Hautrezeptoren entstehen (21).

Die Theorien v. Frey's und Goldscheiders bestimmten im Wesentlichen die Diskussion über die Natur des Schmerzes seit Beginn unseres Jahrhunderts.

2.1.3. Neurophysiologie der Schmerzrezeptoren

Erst in neuerer Zeit ist es durch elektrophysiologische Untersuchungen gelungen, die Existenz hochschwelliger Rezeptoren nachzuweisen, die nur auf Reize hoher, in der Nähe der Gewebsschädigung liegender Intensität reagieren (53).

Histologisch dürften die Nozizeptoren den freien Nervenendigungen entsprechen. Diese kommen ubiquitär in allen Geweben vor und ähneln einander im Aufbau, unterscheiden sich aber in ihrer Verteilungsdichte und ihrer Spezifität für verschiedene Reizformen. Sie entstammen entweder dünnen, markhaltigen Nervenfasern der Gruppe III (Ad) mit einer Leitungsgeschwindigkeit von ca. 11 - 15 m/s oder marklosen Fasern der Gruppe IV (C) mit einer Leitungsgeschwindigkeit von ca. 1 m/s (31,54). Hinsichtlich der Spezifität unterscheidet man verschiedene Gruppen:

- Hochschwellige Mechanorezeptoren, die hauptsächlich durch starke mechanische Reize erregt werden und Nervenfasern der Gruppe III (Ad) als Afferenzen besitzen.
- Thermorezeptoren, durch Hitze erregbar, deren Impulse sowohl über Ad-Fasern als auch über C-Fasern laufen
- Polymodale Rezeptoren, die auf verschiedene Stimuli wie mechanische, thermische oder chemische Reize ansprechen und nur über C-Fasern senden. Sie sind in der Haut des Menschen anscheinend häufiger als die beiden anderen Formen (11,52).

Die Differenzierung der histologisch einheitlichen freien Nervenendigungen in Nociceptoren mit unterschiedlicher funktioneller Spezifität beruht wahrscheinlich auf strukturellen Unterschieden im molekularen Bereich und ist daher einer Beobachtung bisher nicht zugänglich (52).

2.1.4. Schmerzstoffe

An chemischen algogenen Substanzen wurden bisher Bradykinin, Prostaglandine, Serotonin, Histamine, Wasserstoff- und Kalium-Ionen ermittelt. Ihre Wirkung besteht entweder in direkter Erregung der Rezeptoren, oder, in geringerer Konzentration, in Erniedrigung der Schwellen für andere Stimuli wie Hitze oder mechanische Reize (11,31).

Man nimmt an, daß verschiedene Kombinationen dieser Stoffe eine Rolle bei der Schmerzentstehung bei Verletzungen, Entzündungen, Knochentumoren und chronischen Durchblutungsstörungen spielen (66).

Auch die sympathischen Neurotransmitter Adrenalin und Noradrenalin scheinen auf die Erregbarkeit der Nociceptoren Einfluß zu haben.

2.1.5. Afferenzen

Wird ein Nociceptor durch einen adäquaten Reiz stimuliert, produziert er Aktionspotentiale, die über die Ad- und C-Fasern zum Rückenmarkshinterhorn gelangen. Jedoch laufen über die Ad- und C-Fasern nicht ausschließlich nociceptive Afferenzen; es gibt auch Fasern dieser Gruppe, die Impulse niederschwelliger, nichtnociceptiver Rezeptoren weiterleiten (66).

Durch die Frequenz der Aktionspotentiale, die ein Nozizeptor über seinen afferenten Nerven sendet, wird der Schweregrad der Schmerzempfindung kodiert. Eine bestimmte Mindestfrequenz ist nötig, um die Schmerzschwelle zu überschreiten und als Schmerz erkannt zu werden (16).

2.1.6. Erst- und Zweitschmerz

Bei der Auslösung eines Oberflächenschmerzes, z. B. durch einen Nadelstich in die Haut, empfindet man zunächst einen stechend-hellen Schmerz, der schnell abklingt und gut lokalisierbar ist. Bei hohen Reizintensitäten folgt diesem Primärschmerz nach einer Latenzzeit von ca. 0,5 - 1,0 Sekunden ein zweiter Schmerz (Sekundärschmerz), der als dumpf, glühend, von quälendem Charakter und weniger gut lokalisierbar beschrieben wird, und der nur langsam abklingt.

Die Ursache dieses Phänomens ist die unterschiedliche Nervenleitgeschwindigkeit der afferenten nozizeptiven Fasern. Während der Erstschmerz über die schnell leitenden, myelinisierten Ad-Fasern geleitet wird, erfolgt die Übertragung des Zweitschmerzes über die langsameren, unmyelinisierten C-Fasern (37,54,60).

Der helle Schmerz kann gezielte, rasche motorische Reaktionen zum Schutz und zur Abwehr von Schäden auslösen, während der dumpfe Schmerz die Willkürmotorik hemmt (37).

Die Latenzzeit zwischen Erst- und Zweitschmerz ist um so größer, je weiter der Ort der Schmerzentstehung vom Gehirn entfernt ist.

2.2. Impulsverarbeitung im Rückenmark und aufsteigende Bahnen

2.2.1. Rückenmarkshinterhorn

Die erste Relaisstation der nociceptiven Afferenzen befindet sich in der Substantia gelatinosa des Rückenmarkshinterhorns. Hier werden die Entladungen einzelner afferenter Fasern umgeschaltet und als Impulse über den Tractus spinothalamicus lateralis an höher gelegene Zentren weitergegeben. Voraussetzung für die Umschaltung auf die aufsteigenden Schmerzbahnen ist die Überschreitung eines bestimmten Schwellenreizes in der entsprechenden spinalen Relaisstation (53,60).

Durch Konvergenz bzw. zeitliche und räumliche Summation können sich auch unterschwellige Reize aus der Körperoberfläche und aus dem Körperinneren so stark summieren, daß Schmerz empfunden wird.

Hier erfolgt zum ersten Mal eine Modifizierung des afferenten Einstroms durch übergeordnete Zentren. Der sensomotorische Kortex übt über descendierende Bahnen eine Steuerungsfunktion auf die Substantia gelatinosa aus. Auch Neurone in der Formatio reticularis vermögen direkt über descendierende Fasern die Erregungen in der Substantia gelatinosa zu steuern (25).

2.2.1.1. Schmerzverdeckung

Eine weitere Modifizierung des nozizeptiven Inputs kann durch gleichzeitig mit nociceptiven Afferenzen über das Hinterhorn eintretende afferente Impulse anderer, nicht nociceptiver Rezeptoren erfolgen. Diese können die Schwelle der Hinterhorn-Neuronen für nociceptive Impulse so weit anheben, daß kein nociceptiver Impulsstrom an das ZNS weitergeleitet wird (61). Dieses Phänomen ist in der Psychophysik als Schmerzverdeckung bekannt, und beruht auf der Tatsache, daß wir nicht in der Lage sind, gleichzeitig im Bewußtsein mehr als 100 bit/sec zu verarbeiten, bzw. zu empfinden(37).

2.2.1.2. Übertragener Schmerz

An einem Interneuron des Hinterhorns konvergieren sowohl afferente nociceptive Fasern aus der Haut als auch aus den Eingeweiden und den tiefen Geweben. Aus diesem Grund besteht für das Individuum oft keine Möglichkeit festzustellen, ob ein auftretender Schmerz aus einem erkrankten Eingeweideorgan, dem entsprechenden Dermatom oder den tiefen Geweben dieses Segments kommt. Bei Erkrankungen der

Eingeweideorgane wird deshalb der Schmerz nicht selten in die entsprechenden Dermatome projiziert, was in der Klinik als Phänomen des übertragenen Schmerzes bekannt ist.

2.2.2. Aufsteigende Bahnen

Nach der Umschaltung in den Interneuronen des Rückenmarkshinterhorns erfolgt die Weiterleitung der nociceptiven Afferenzen nach Kreuzung der Mittellinie im anterolateralen Faszikel der Gegenseite. Dieser läßt sich funktionell in zwei Bahnsysteme unterteilen :

2.2.2.1. Tractus neo-spinothalamicus

Im phylogenetisch jüngeren neo-spinothalamischen Trakt werden die Afferenzen aus den schnell leitenden Ad-Fasern geleitet. Er steigt zu bestimmten Projektionskernen des Thalamus auf und endet im ventro-posterior-lateralen Kerngebiet des Thalamus, das eine somatotopische Gliederung aufweist (25). Von dort aus bestehen direkte Verbindungen zu den Arealen SI und SII des sensomotorischen Kortex. Auf Grund der vorwiegend monosynaptischen Verbindungen des neospinothalamischen Trakts erfolgt eine schnelle Weiterleitung der Impulse. Er hat eine vorwiegend sensorisch-diskriminative Funktion, die eine räumliche und zeitliche Lokalisation von schmerzhaften Reizen ermöglicht.

2.2.2.2. Tractus paläo-spinothalamicus

Die Weiterleitung der verzögerten, schlecht lokalisierbaren und stark affektbetonten Schmerzkomponente, deren Afferenzen über die C-Fasern verlaufen, erfolgt im phylogenetisch älteren paläo-spinothalamischen oder spinoreticulothalamischen Trakt, der polysynaptisch verschaltet ist und daher langsamer leitet. Dieses System ist wahrscheinlich weniger für die Vermittlung von Schmerz aus der Haut, als aus den Eingeweiden und tiefen Geweben zuständig. Es projiziert hauptsächlich in die Formatio reticularis des Hirnstamms. Von dort bestehen Verbindungen zu den intralaminären Kernen des Thalamus und in die limbische Region. Einige spinoreticuläre Fasern projizieren in die graue Substanz des Mesencephalons im Bereich des Aquäduks und von dort in die limbische Region(11,60).

2.3. **Formatio reticularis**

Die *Formatio reticularis* spielt nach Struppler (61) eine entscheidende Rolle in der zentralen Verarbeitung nozizeptiver Impulse, da von ihr aus nicht nur der afferente Zustrom auf spinaler Ebene kontrolliert, sondern auch die Hirnrinde aktiviert wird. In einem Rückkopplungsmechanismus wird durch kortikothalamische Impulse der thalamokortikale Einstrom geregelt, wodurch sich z.B. das Phänomen erklären läßt, daß unter hoher emotionaler Erregung trotz schwerer Verletzungen oft kein Schmerz wahrgenommen wird.

2.4. **Hirnrinde**

Im Kortex erfolgt die bewußte Wahrnehmung und Lokalisation des Schmerzes. Durch Erfahrung wird die Schmerzerinnerung gebildet und so eine Wertung des Schmerzes ermöglicht. "Entsprechend der individuellen "psychogenen Reaktionskomponente" wird der Schmerz zur Persönlichkeitsfrage" (Struppler).

2.5. **Zusammenfassung**

Ein kurzer Überblick über die neurophysiologischen Mechanismen der Schmerzentstehung, soweit sie bisher erforscht sind, zeigt bereits, welch ein komplexes Geschehen aus peripheren und zentralen Verrechnungs- und Summationsprozessen von fördernden und hemmenden, aszendierenden und deszendierenden Impulsen die Wahrnehmung von Schmerz darstellt.

Die große Zahl der subkortikalen Zentren, die in die Verarbeitung der afferenten nozizeptiven Impulse involviert sind, bis es zur bewußten Schmerzwahrnehmung kommt, und die daraus resultierende große Zahl unterbewußter Einflußgrößen machen die Durchführung quantitativer Schmerzmessungen sehr schwierig und lassen so strenge Anforderungen an die Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse, wie sie in anderen Teilgebieten der medizinischen Forschung gestellt werden, praktisch nicht zu.

Experimentelle neurophysiologische Untersuchungen des Schmerzsinnens am Menschen müssen aus ethischen Gründen auf die peripheren Mechanismen der Schmerzentstehung beschränkt bleiben. Zur Untersuchung der psychischen Bedingungen der Schmerzempfindung bedient man sich der Psychophysik.

3. Psychophysikalische Grundlagen

3.1. Begriffsbestimmung

Will man experimentelle Schmerzmessungen am Menschen durchführen, muß man sich der Theorie und Methodik der Psychophysik bedienen.

Die Psychophysik stellt, wie schon der Name ausdrückt, eine Beziehung zwischen der Intensität physikalischer Reize und der psychischen bzw. sensorischen Intensität her.

Auf Grund neuerer Erkenntnisse unterscheidet man zwischen klassischer und neuer Psychophysik, die sich sowohl in Theorie, als auch - daraus folgend - in der Methodik unterscheiden.

Während in der neuen Psychophysik versucht wird, Empfindungsintensitäten unmittelbar zu quantifizieren, indem variable Reize in Beziehung zu einem vorgegebenen Standardreiz eingeschätzt werden, bedient sich die klassische Psychophysik indirekter Methoden der Empfindungsmessung, indem die Messung der sensorischen Intensität durch Messung der Reizintensität geschieht (64).

Da letzteres auch Ziel der vorliegenden Arbeit ist - die Untersuchung der Empfindlichkeit für Druckschmerz durch Messung der für eine bestimmte Empfindungsquantität nötigen Auflagedruckstärke - sollen im Folgenden theoretische Grundlagen und Methodik der klassischen Psychophysik kurz dargestellt werden.

3.2. Psychophysikalische Theorie

3.2.1. Der Begriff der Schwelle

3.2.1.1. Absolutschwelle

Zentraler Pfeiler der klassischen Psychophysik ist das Konzept der sensorischen Schwelle. Die Absolutschwelle oder Wahrnehmungsschwelle ist definiert als die niedrigste Stimulusenergie, die benötigt wird, um eine bestimmte Empfindung hervorzurufen.

Da die Schwelle eines Individuums gewissen Schwankungen unterworfen ist, werden verschiedene Bestimmungen der minimalen Stimulusenergie durchgeführt und daraus ein Durchschnittswert gebildet, um einen möglichst exakten Wert zu erhalten(19).

3.2.1.2. Unterschiedsschwelle

Wird ein Stimulus oberhalb der Absolutschwelle der untersuchten Sinnesmodalität zugeführt, muß seine Intensität um einen kritischen Betrag erhöht oder vermindert werden, bevor die Versuchsperson eine Änderung der Empfindungsstärke wahrnimmt. Die Unterschiedsschwelle ist definiert als der Betrag, um den die Stimulusintensität verändert werden muß, um einen gerade wahrnehmbaren Unterschied (just noticeable difference = JND) in der Empfindungsstärke hervorzurufen (19).

3.2.2. Das psychophysikalische Grundgesetz

3.2.2.1. Webersches Gesetz

Weber (1846) stellte fest, daß Versuchspersonen, die Gewichte anheben und einschätzen sollten, wie schwer sie waren, bei hohen Gewichten einen größeren Gewichtszuwachs benötigten, um ihn als solchen wahrzunehmen, als bei geringen Gewichten. Er erkannte, daß das Verhältnis von Ausgangsgewicht zu derjenigen Gewichtszunahme, die nötig war, um eben wahrgenommen zu werden, einen konstanten Wert ergibt und daß sich diese Gesetzmäßigkeit auch auf andere Sinnesmodalitäten anwenden läßt.

Mathematisch ausgedrückt lautet das Webersche Gesetz :

$$dI/I = C$$

wobei I die Ausgangsstimulusintensität

dI die zur Wahrnehmung nötige Stimuluszunahme

C die auch als Weber'scher Bruch bezeichnete konstante Verhältniszahl

bedeuten.

Die Größe der Unterschiedsschwelle ist also eine lineare Funktion der Stimulusintensität, wobei der Stimulus immer um einen konstanten Bruchteil seines Wertes erhöht werden muß, um einen eben noch merklichen Empfindungsunterschied hervorzurufen(64).

3.2.2.2. Fechner'sches Gesetz

Ausgehend von Weber's Gesetz erkannte Fechner, der die subjektive Gleichheit aller JND's postulierte, daß aus der linearen Verknüpfung von Ausgangsstimulusintensität und der zu einem Empfindungszuwachs nötigen Reizsteigerung eine logarithmische Verknüpfung von Empfindungsstärke und Stimulusintensität resultierte(63).

Das von ihm formulierte Gesetz lautet:

$$E = k \times \log S$$

mit E = Empfindungsstärke

S = Stimulusintensität

k = Konstante

Es besagt, daß bei geometrischer Stimuluszunahme die Empfindungsintensität arithmetisch anwächst.

3.2.2.3. Kritische Punkte des Weber-Fechner'schen Gesetzes

Da das Fechner'sche Gesetz auf dem Weber'schen beruht, ist es nur gültig, wenn die Beziehung $dI/I = C$ zutrifft. In neuerer Zeit ergaben jedoch experimentelle Überprüfungen, daß die Konstanz des Verhältnisses dI/I nicht über die gesamte Spannweite der Stimulusintensität gilt.

Bei Reizintensitäten im Bereich der Absolutschwellen der jeweiligen Sinnesmodalität nimmt der Wert des Weber'schen Bruches als Funktion der Reizintensität zunächst mit steigender Stimulusenergie ab, um bei höheren Reizenergien einen konstanten Wert anzunehmen.

Die Gültigkeit des Weber-Fechner'schen Gesetzes ist also auf den Bereich oberhalb eines bestimmten Abstandes zur Absolutschwelle beschränkt.

3.3. Methodik der klassischen Psychophysik

3.3.1. Grundlagen

Das Prinzip aller Schwellenmessungen besteht darin, daß eine Versuchsperson einem Reiz ausgesetzt wird und angibt, ob sie ihn wahrnimmt oder nicht.

Ausgehend von Fechner's Erkenntnissen über die gesetzmäßigen Zusammenhänge von Stimulus und Empfindung wurden verschiedene Methoden der experimentellen Schwellenbestimmung entwickelt, die heute in weiten Bereichen der Psychologie Anwendung finden. Nach Gescheider (19) lassen sich die drei am häufigsten benutzten Methoden wie folgt beschreiben :

3.3.2. Methode der konstanten Reize

Bei dieser Methode werden dem Probanden mehrmals dieselben Stimuli in normalerweise 5 - 9 verschiedenen Reizstärken dargeboten. Es ist erforderlich, jede Stimulusstärke in zufälliger Reihenfolge gewöhnlich über 100 mal zu applizieren. Der Prozentsatz der Wahrnehmungen wird als Funktion der Stimulusintensität ermittelt. Die Schwelle wird definiert als derjenige Stimuluswert, der in 50 % der Reizapplikationen wahrgenommen wurde. Er kann aus dem Graphen der psychometrischen Funktion, die normalerweise s-förmig ist, bestimmt werden.

Zur Bestimmung der Unterschiedsschwellen werden dem Probanden Reizpaare angeboten, und er muß angeben, welcher Reiz aus den angebotenen Paaren jeweils zur Wahrnehmung einer Reizzunahme führt. Dabei hat eine der Stimulusintensitäten eines jeden Paares einen festen Wert und wird als Standartreiz bezeichnet. Der Wert des anderen Stimulus, des Vergleichsreizes, wird von Versuch zu Versuch verändert. Die Werte des Vergleichsreizes werden so gewählt, daß der größte Stimuluswert fast immer größer und der kleinste Stimuluswert fast immer kleiner als der Standartreiz beurteilt werden.

Jeder der Vergleichsreize wird in zufälliger Reihenfolge als Paar mit dem Standartreiz zusammen appliziert und die Versuchsperson gibt an, welcher der beiden Reize die größere Empfindungsstärke hervorruft. Der Prozentsatz der "größer"-Empfindungen wird wieder als Funktion der Größe des Vergleichsreizes bestimmt. Der 50 %-Wert des Funktionsgraphen entspricht normalerweise der Größe des Standartreizes. Der 75 %-Wert gibt die Höhe der oberen und der 25 %-Wert die der unteren Schwelle an.

3.3.3. Grenzmethode

Bei der Messung der Absolutschwellen mit der Grenzmethode wird zunächst ein Reiz weit unterhalb oder weit oberhalb der Schwelle appliziert. Bei jeder folgenden Reizapplikation nähert man sich der Schwelle durch allmähliche Vergrößerung oder Verkleinerung der Stimulusintensität, bis die Wahrnehmungsschwelle erreicht ist.

Der Stimulus wird jeweils in einer ansteigenden oder einer abfallenden Serie angeboten. Bei der ansteigenden Serie wird der Stimulus so lange gesteigert, bis die Versuchsperson angibt, daß eine Wahrnehmung des Reizes stattfindet. Bei der absteigenden Serie wird die Reizintensität so lange vermindert, bis der Proband das Verschwinden der Wahrnehmung meldet.

Sowohl auf- als auch absteigende Serien werden mehrmals wiederholt und die Schwelle als Durchschnitt der dabei erhaltenen Werte betrachtet.

Zur Bestimmung der Unterschiedsschwellen wird die Applikation von Reizpaaren in auf- oder absteigender Serie durchgeführt. Von Messung zu Messung wird der Vergleichsreiz um einen kleinen Betrag in Richtung auf den Standartreiz verändert, bis die Versuchsperson angibt, daß sie die Reize als gleich groß wahrnimmt, und darüber hinaus, bis zwischen Standart- und Vergleichsreiz wieder ein Unterschied wahrnehmbar wird. Die beiden pro Serie erhaltenen Übergangspunkte werden als obere und untere Schwelle bezeichnet.

Für die bei mehreren Durchgängen erhaltenen Werte der oberen und unteren Schwelle wird der jeweilige Mittelwert gebildet. Durch Subtraktion des Mittelwerts der unteren vom Mittelwert der oberen Schwelle erhält man das sogenannte Unsicherheitsintervall, innerhalb dessen die Versuchsperson keinen Unterschied zwischen Standart- und Vergleichsreiz angeben kann. Die Unterschiedsschwelle errechnet sich als Hälfte des Unsicherheitsintervalls.

3.3.3.1. Die Treppenmethode

Die Treppenmethode ist eine Abwandlung der Grenzmethode.

Der Versuchsperson wird zunächst eine auf- oder absteigende Serie von Reizen präsentiert, und die Versuchsperson gibt durch "Ja"- oder "Nein"-Antworten an, ob sie den Reiz wahrnimmt. Wenn die Versuchsperson ihre Antwort ändert, wird die Richtung der Reizänderung von steigend zu fallend bzw. umgekehrt verändert. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis eine ausreichende Anzahl von Umkehrpunkten bestimmt wurde.

Die Schwelle erhält man nun als Mittelwert der Stimuluswerte an den Umkehrpunkten (7).

Der Vorteil dieser Methode liegt in der Zeitersparnis, da keine Stimuluswerte weit ober- oder unterhalb der Schwelle angeboten werden.

3.3.4. Einstellungsmethode

Bei dieser Methode wird der Reiz durch die Versuchsperson selbst manipuliert.

Begonnen wird entweder mit einem Reiz weit unter- oder weit oberhalb der Schwelle, der kontinuierlich verändert wird, bis er gerade wahrnehmbar oder gerade nicht mehr wahrnehmbar wird.

Bei der Unterschiedsschwellenbestimmung verändert die Versuchsperson den Vergleichsreiz so lange, bis er in der Wahrnehmung dem Standartreiz gleich ist. Dieser Vorgang wird mehrmals wiederholt. Die Intensitätsdifferenzen zwischen dem Standart- und dem Vergleichsreiz, der in der Empfindungsstärke als gleich eingeschätzt wurde, sind normalverteilt. Der Mittelwert der resultierenden Gauß-Kurve bildet den Punkt der subjektiven Gleichheit und die Standartabweichung wird als Maß für die Unterschiedsschwelle herangezogen.

Der Vorteil dieser Methode ist, daß der Proband aktiv am Experiment teilnimmt. Voraussetzung für ihre Anwendung ist die kontinuierliche Veränderbarkeit des Reizes.

3.3.5. Fehlerquellen

Alle Methoden, die auf der Applikation von Standart- und Vergleichsreiz beruhen, weisen typische systematische Fehlerquellen auf.

3.3.5.1. Räumlicher Fehler

Wenn Stimuli an verschiedenen receptiven Feldern appliziert werden, kann die Wahrnehmung ihrer Empfindungsstärke durch Unterschiede in Art und Größe des jeweiligen receptiven Feldes beeinflusst werden. Auch die Gleichheit der Stimulusqualität ist nicht gesichert. Es ist daher schwierig, Aussagen über die Fähigkeit eines Probanden zur Unterscheidung von Reizen zu machen.

Um die Auswirkungen des räumlichen Fehlers zu reduzieren, könnte der Standardreiz in der Hälfte der Versuche am einen und in der anderen Hälfte am anderen rezeptiven Feld appliziert werden.

3.3.5.2. Zeitlicher Fehler

Im anderen Fall, wenn Standard- und Vergleichsreiz nacheinander am selben rezeptiven Feld präsentiert werden, muß der Proband den zweiten Stimulus mit dem Erinnerungseindruck des ersten vergleichen. Bei einem schnellen Verblassen des Erinnerungseindrucks würde dann der erste Reiz immer als schwächer als der zweite eingeschätzt, auch wenn beide in ihrer physikalischen Größe identisch sind.

Die verbreitetste Methode zur Vermeidung dieses Fehlers ist die Applikation des Standardreizes in der einen Hälfte der Versuche als ersten und in der anderen Hälfte als zweiten Reiz, so daß sich bei Zusammenfassung der Ergebnisse die Einflüsse der Fehlerquellen gegenseitig aufheben.

3.3.5.3. Systematische Fehlerquellen der Grenzmethode

3.3.5.3.1. Gewöhnungsfehler (Error of habituation)

Bei einer allmählichen Veränderung der Stimulusintensität in Richtung der Schwelle im Laufe mehrerer Versuchsdurchgänge besteht die Gefahr, daß eine Versuchsperson die Tendenz entwickelt, dieselbe Antwort aus Gewöhnung zu wiederholen, auch wenn die Reizgröße verschieden ist, die Stimulusveränderung also erst mit Verzögerung zu realisieren.

Der Effekt sind zu hohe Schwellenwerte bei der ansteigenden und zu niedrige bei der absteigenden Reizserie.

3.3.5.3.2. Erwartungsfehler (Error of expectation)

Der entgegengesetzte Effekt tritt beim sogenannten Erwartungsfehler ein, wenn der Proband vorzeitig das Erreichen der Schwelle angibt. In diesem Fall sind die Schwellen bei ansteigenden Reizserien falsch niedrig und bei absteigenden Serien falsch hoch.

3.3.5.3.3. Möglichkeiten zur Vermeidung

Zur Vermeidung von Gewöhnungstendenzen sollte die Durchführung exzessiv langer Versuchsserien möglichst vermieden werden.

Die Einflüsse der Erwartungshaltung können durch Variierung der Startpunkte der Messungen verringert werden.

Ein vorbereitender Probedurchgang und sorgfältige Instruktion der Versuchspersonen sind wichtig, um die genannten Fehler auszuschalten oder zumindest zu verringern.

4. Entwicklung des Versuchsaufbaus

4.1. Bereits vorhandener Versuchsaufbau

Für die Vorversuche wurde zunächst der von P. Schaff (50) entwickelte Versuchsaufbau herangezogen.

Als Druckstempel dient ein Metallplättchen der Fläche 10x10 mm, das über ein Kugelgelenk mit einem Ringkraftmesser verbunden ist. Dieser ist zur besseren Führung in einer Bohrmaschinenhalterung angebracht.

Bei der Versuchsdurchführung bewegt der Versuchsleiter den Druckstempel manuell nach unten auf den Unterschenkel der Versuchsperson, der in einer Schaumstoffschiene gelagert ist. Die Versuchsperson teilt das Erreichen der Schmerzschwelle durch ein verbales Signal mit, auf das hin die Druckstweigerung eingestellt und der erreichte Druckwert vom Ringkraftmesser abgelesen und protokolliert wird.

4.1.1. Vorteile des Meßsystems

1. Der Aufbau ist relativ unkompliziert.
2. Das System läßt sich gut transportieren.
3. Der Druckstempel läßt sich leicht auf die jeweiligen Meßpunkte justieren, wodurch ein geringer Zeitaufwand pro Untersuchung resultiert.

4.1.2. Nachteile des Meßsystems

1. Durch die manuelle Bedienung der Versuchsanordnung ist es nicht möglich, eine konstante Absenkgeschwindigkeit des Druckstempels zu erreichen.
2. Der Versuchsleiter stellt das Absenken des Druckstempels dann ein, wenn ihm die Versuchsperson durch ein verbales Signal zu verstehen gibt, daß die Schmerzschwelle erreicht ist. Der gemessene Druckwert wird also durch die Reaktionszeit des Versuchsleiters beeinflusst.
3. Bei mechanischen Ringkraftmessern der erforderlichen Genauigkeit von 1 N werden die erhaltenen Meßwerte bei Druckwerten über 100 N/cm² unzuverlässig, weil bei Werten dieser Größenordnung eine Verformung des Metallringes auftritt, die kein ordnungsgemäßes Funktionieren des Ringkraftmessers mehr gewährleistet.

4. Die Protokollierung der vom Ringkraftmesser während des Versuchs angezeigten Druckwerte von Hand birgt weitere Fehlermöglichkeiten in sich.

4.2 Neu entwickelte Versuchsanordnung

Um die vorgenannten Nachteile zu beseitigen, wurde ein neuer Versuchsaufbau entwickelt. Kernstück dieses Aufbaus ist eine Universalprüfmaschine der Firma Zwick, deren genaue Beschreibung unter 5. nachzulesen ist.

4.2.1 Vorteile des neuen Meßsystems

Der neue Versuchsaufbau birgt einige entscheidende prinzipielle Vorteile gegenüber dem vorhergehenden :

1. Die Einflußmöglichkeiten des Versuchsleiters auf den Versuchsablauf sind minimiert, da die Bewegung des Unterschenkels gegen den Druckstempel nach dem Start des Versuchs maschinell gesteuert wird und durch die Versuchsperson mittels Knopfdruck direkt beendet werden kann, wodurch die Reaktionszeit des Versuchsleiters als Einflußgröße auf das Meßergebnis beseitigt ist.
2. Das verwendete elektronische Druckmeßsystem liefert innerhalb eines Meßbereichs von 1 - 10000 N zuverlässige Meßergebnisse.
3. Die Protokollierung der gemessenen Werte erfolgt als Druckverlaufskurve parallel zum Versuchsablauf auf einem Kurvenschreiber. Dadurch können exakte Zeitverlaufskurven der Druckentwicklung aufgenommen werden und die Meßwerte sind besser objektivierbar.

4.2.2 Nachteile des neuen Meßsystems

Als Nachteile müssen erwähnt werden :

1. Die umständliche Justierung des Druckstempels auf die verschiedenen Meßpunkte bedingt einen erheblich gestiegenen Zeitaufwand pro Versuchsperson.
2. Die Ausmaße der Meßapparatur machen einen Transport unmöglich, so daß alle Messungen am Standort der Prüfmaschine stattfinden mußten.

5. Versuchsaufbau

Der für die Untersuchungen verwendete Versuchsaufbau besteht aus

1. einem planen Druckstempel der Fläche 12x17 mm aus Metall, der über ein Kugelgelenk an die Druckmeßvorrichtung montiert werden kann. Die Oberfläche des Druckstempels ist durch eine 10 mm starke Schicht aus Moosgummi abgepolstert.
2. einer Universalprüfmaschine der Firma Zwick
3. einer Kunststoffschiene zur bequemen und kippstabilen Fixation des Unterschenkels der Probanden
4. einer 135 cm hohen Plattform aus Metallrohren, auf der die Versuchspersonen während der Messungen Platz nehmen mußten.

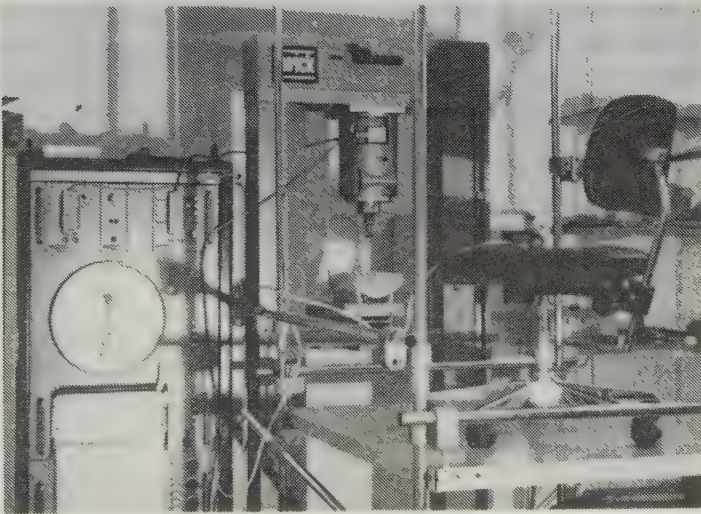


Abbildung 1: Universalprüfmaschine mit Druckmeßdose und angekoppeltem Druckstempel, sowie Plastikschiene und Meßplattform

ad 2: Die Universalprüfmaschine der Firma Zwick wird normalerweise zu Materialprüfungen verwendet und kann Druck- und Zugkräfte bis 1000 kp erzeugen und messen. Als Kraftaufnehmer dient eine elektronische Druckmeßdose mit einem Meßbereich von 1 - 10000 N. Die gemessenen Druckwerte werden sowohl auf einer Meßskala angezeigt als auch als Druckverlaufskurve auf einen Schreiber übertragen.

Die Druckerzeugung erfolgt durch die Bewegung einer stählernen Querstrebe, die sich, angetrieben durch je ein Schneckengewinde auf jeder Seite, in vertikaler Richtung gegen die Druckmeßdose und den an ihr befestigten Druckstempel bewegt. Die Geschwindigkeit der Vertikalbewegung läßt sich von 0,1 mm/min bis 200 mm/min regulieren.

Zum an der Schalttafel der Prüfmaschine befindlichen Aus-Schalter für die Vertikalbewegung wurde ein weiterer Taster in Reihe geschaltet. Dieser Taster kann über ein Verlängerungskabel direkt durch die Versuchsperson bedient werden.

ad 3: Die Kunststoffschiene wurde nach den Proportionen eines menschlichen Unterschenkels modelliert und mit einer Stoffpolsterung zur Vermeidung von Druckstellen versehen. Die Befestigung an der beweglichen Querstrebe der Prüfmaschine erfolgte so, daß die Schiene mit dem Unterschenkel des Probanden zur genauen Justierung des Druckstempels sowohl in Längs- als auch in Querrichtung des Unterschenkels verschoben werden konnte.

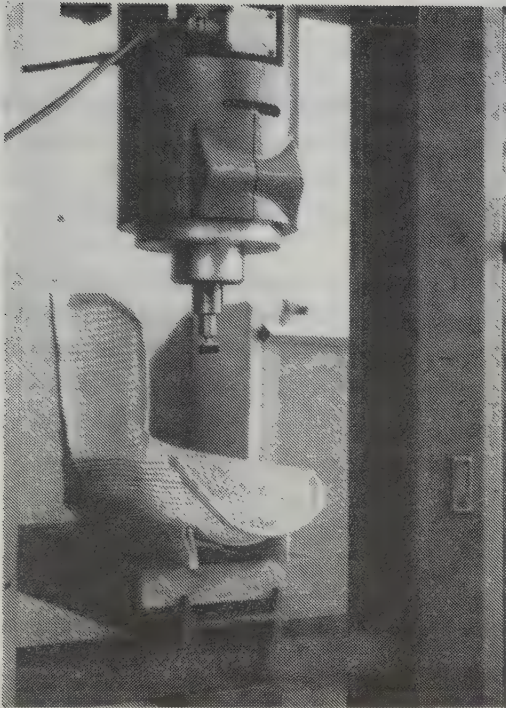


Abbildung 2 : Beweglicher Schlitten mit darauf
montierter Kunststoffschiene, so-
wie Meßdose mit Druckstempel

ad 4: Da der Druckaufnehmer der Prüfmaschine vom Hersteller in einer Höhe von 170 cm fest montiert ist, wurde eine Plattform aus Stahlrohren konstruiert, auf der die Versuchspersonen während der Messungen Platz nahmen.

6. Auswahl der Versuchspersonen

Die Untersuchungen wurden an 15 männlichen und 15 weiblichen Probanden durchgeführt.

6.1. Medizinische Auswahlkriterien

Es handelte sich um stoffwechselgesunde, bei grobneurologischer Untersuchung unauffällige Personen ohne orthopädische Vorerkrankungen oder Frakturen im Unterschenkelbereich, sowie ohne Hauterkrankungen, Hautverletzungen, Narben oder Keloidbildung im untersuchten Hautareal. Keine der Versuchspersonen nahm Medikamente ein.

6.2. Alter

Das Durchschnittsalter der Frauengruppe lag bei 23,2 Lebensjahren mit einer Streuung von 20 bis 27 Jahren, das der Männergruppe bei 26,5 Lebensjahren mit einer Streuung von 21 bis 34 Jahren.

6.3. Fahrkönnen

Bei dem überwiegenden Teil (10 Personen) der Männer handelte es sich nach eigener subjektiver Einschätzung um S-Fahrer, 3 waren nach eigener Einschätzung A-Fahrer und 2 betreiben keinen alpinen Skisport. Innerhalb der Frauengruppe beurteilten sich 4 Personen als S- bzw. A/S-Fahrer, 6 als A-Fahrer, 4 als L-Fahrer und 1 Person betreibt keinen alpinen Skisport.

7. Festlegung der Meßpunkte

Zur Untersuchung etwaiger lokaler Unterschiede der Druckschmerzempfindlichkeit am distalen Unterschenkel wurde die Schmerzschwelle an 14 Meßpunkten bestimmt. Die Lage der Meßpunkte wurde so gewählt, daß die vom Großteil der handelsüblichen Skistiefelmodelle bedeckte Unterschenkellänge berücksichtigt wurde.

Um die Meßwerte an den jeweiligen Punkten interindividuell direkt miteinander vergleichen zu können, mußte die individuell verschiedene Länge des Unterschenkels berücksichtigt werden.

Die Länge der Tibia wurde daher bei allen Versuchspersonen durch Messung des Abstandes von Malleolus medialis und medialem Kniegelenksspalt bestimmt.

Als Fixpunkte wurden die Meßpunkte 1, 5 und 9 gewählt.

Meßpunkt 1 wurde auf den Mittelpunkt der Verbindungslinie der Malleolen gelegt, Meßpunkt 5 entspricht dem distalen Sechstelpunkt der Tibia und Meßpunkt 9 dem Tibiamittelpunkt.

Der Abstand zwischen Meßpunkt 1 und Meßpunkt 5 wurde durch die Meßpunkte 2 - 4 in vier gleich lange Teilstrecken unterteilt, ebenso der Abstand zwischen Meßpunkt 5 und Meßpunkt 9 durch die Meßpunkte 6 - 8.

Die Meßpunkte 1 - 4 liegen in der Mittellinie des Unterschenkels auf den über die Tibia hinwegziehenden Endsehnen der Muskuli tibialis anterior und extensor hallucis longus.

Die Meßpunkte 5 - 9 wurden auf den Margo anterior tibiae gelegt.

Die Meßpunkte 10 - 14 liegen mit von proximal nach distal ansteigender Nummerierung auf dem paratibialen Muskelgewebe der Muskuli tibialis anterior und extensor hallucis longus, jeweils in gleicher Höhe zu dem auf der Tibia liegenden Meßpunkt, also Meßpunkt 10 lateral von Meßpunkt 9, Meßpunkt 11 lateral von Meßpunkt 8 usw.

Alle Messungen wurden mit quer zur Unterschenkellängsachse aufliegendem Druckstempel durchgeführt.

8. Versuchsdurchführung

Zur Versuchsdurchführung wurde eine Abwandlung von Grenz- bzw. Einstellungsmethode verwendet. An Stelle von auf- und absteigenden Reizserien wurden nur aufsteigende Serien in Form von kontinuierlich zunehmenden Druckwerten appliziert, da absteigende Reizserien, mit einem Startpunkt deutlich oberhalb der Schmerzschwelle, den Versuchspersonen nicht zumutbar waren. Die Versuchspersonen nahmen, entsprechend der Einstellungsmethode, aktiv am Versuchsgeschehen teil, indem sie den Endpunkt der Reizzunahme durch Knopfdruck selbst bestimmen konnten.

Vor dem Versuch wurden Name, Körpergröße, Gewicht, Unterschenkelhöhe, gemessen zwischen medial-em Kniegelenkspalt und Malleolus medialis, Unterschenkelumfang in Höhe der Malleolengabel, der Unterschenkelmitte und des Tibiakopfes, sowie das Fahrkönnen der Versuchsperson nach deren subjektiver Einschätzung notiert.

Die Versuchspersonen nahmen auf der Plattform auf einem Stuhl Platz und legten den rechten Unterschenkel in die Kunststoffschiene, so daß er bequem gelagert war. Beim Aufbringen des Drucks wurde dadurch ein seitliches Abgleiten oder Verkippen verhindert. Die Meßpunkte wurden mit einem Fettstift auf der Haut des Unterschenkels markiert.

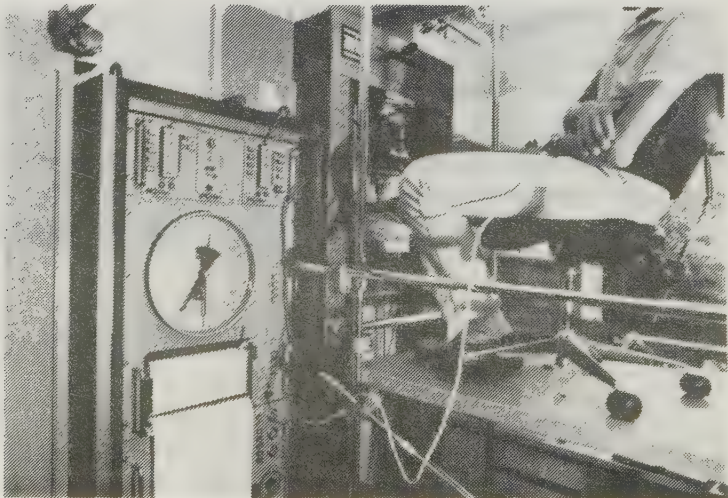


Abbildung 3: Versuchsausrüstung mit Versuchsperson

Die Versuchspersonen wurden sodann ausführlich über den Ablauf des Versuchs aufgeklärt und aufgefordert, bei Erreichen der Schmerzschwelle die Maschine durch Knopfdruck auf den Aus-Taster zu stoppen. Insbesondere wurde die Sicherheitsschaltung der Versuchsapparatur hervorgehoben, durch die der Versuchsleiter den Druckanstieg auch bei einem Versagen des Aus-Schalters anhalten konnte, um etwa vorhandene Ängste der Probanden zu beseitigen, die zu einem verfrühten Anhalten der Maschine und damit zu einer Verfälschung der Meßwerte führen könnten. Um Mißverständnissen vorzubeugen, wurden die Probanden ausdrücklich darauf hingewiesen, daß sie den Aus-Schalter nur dann betätigen sollten, wenn der zunehmende Druck in Schmerz überginge.

Dann wurde die Kunststoffschiene mit dem Unterschenkel des Probanden so auf dem beweglichen Schlitten verschoben, daß der Druckstempel auf Meßpunkt Null justiert war, und der Schlitten so weit nach oben gefahren, daß der Stempel die Haut des Unterschenkels gerade berührte.

Die Maschine wurde mit einer Geschwindigkeit der Vertikalbewegung von 60 mm/min gestartet und der Beginn des Versuchs dem Probanden mitgeteilt. Nach dem Abstoppen durch die Versuchsperson wurde der Schlitten sofort in die Ausgangsposition zurückgefahren und der Ablauf mit Pausen von jeweils fünf Sekunden viermal wiederholt.

Danach wurde die Versuchseinrichtung auf den nächsten Meßpunkt justiert und ebenso verfahren.

Alle Versuche fanden in einem abgeschlossenen Raum ohne störende Umgebungsgeräusche und bei konstanter Raumtemperatur von 21 C° statt.

9. Ergänzende Messungen

9.1. Follow up - Untersuchungen

9.1.1. Ziel des Versuchs

Es sollte sowohl die Kurzzeit- als auch die Langzeitvariabilität der ermittelten Meßdaten ermittelt werden, um die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse zu überprüfen.

9.1.2. Aufbau und Durchführung

Zur Untersuchung der Kurzzeitvariabilität wurden an einzelnen Meßpunkten Nachmessungen nach Ablauf von maximal fünf Minuten durchgeführt.

Die Langzeitvariabilität wurde durch Wiederholung des gesamten Hauptversuchs (14 Meßpunkte) an fünf Versuchspersonen nach Ablauf von vier Monaten ermittelt.

Der verwendete Versuchsaufbau bestand in allen Fällen aus der in 6. beschriebenen Apparatur mit der Prüfmaschine als Kernstück.

9.2. Bestimmung der Unterschiedsschwellen für Druck am Unterschenkel

9.2.1. Ziel der Untersuchung

Es sollten die für die Versuchspersonen gerade noch wahrnehmbaren Druckdifferenzen (= Unterschiedsschwellen) bei Druckwerten steigender Intensität bestimmt werden. Es galt zu überprüfen, ob die gemessenen Werte den Forderungen des Weber-Fechner'schen Gesetzes (siehe 3.2.2.1.) entsprechen.

9.2.2. Aufbau und Durchführung

Verwendet wurde der in 6. beschriebene Versuchsaufbau.

Die Messung erfolgte am Meßpunkt 5 auf der Tibiavorderseite.

Der bewegliche Schlitten wurde nach oben gefahren, bis die Versuchspersonen die Berührung der Druckstempeloberfläche an der Haut des Unterschenkels wahrnehmen konnten. Dann wurden sie aufgefordert, die Maschine zu stoppen, sobald eine Zunahme des auf den Unterschenkel einwirkenden Druckes spürbar wurde. Der Versuchsleiter startete die Versuchsanlage mit einer Schlittengeschwindigkeit von 10 mm/min.

Wenn die Versuchsperson die Maschine durch Druck auf den Aus-Taster angehalten hatte, wurde diese nach einer Zeit von 2 Sekunden, ohne vorher wieder in die Ausgangsposition zurückgefahren worden zu sein, erneut gestartet. Dieser Ablauf wurde wiederholt, bis die Versuchsperson angab, daß die Schmerzschwelle erreicht sei. Dann wurde der Schlitten sofort nach unten in die Ausgangsposition zurückgefahren und die gesamte Messung nach einer Erholungszeit von jeweils 30 Sekunden zweimal wiederholt.

Der Verlauf der auftretenden Druckwerte wurde während der Messungen als Kurve mitgeschrieben.

9.3. Bestimmung der Schwelle für Druckschmerz bei erniedrigter Hauttemperatur

9.3.1. Ziel des Versuchs

Es sollte untersucht werden, ob sich eine Abhängigkeit der Druckschmerzschwelle von der Höhe der Hauttemperatur am Punkt der Druckeinwirkung ermitteln läßt.

9.3.2. Aufbau und Durchführung

Eine Verwendung der Universalprüfmaschine war bei diesem Versuch nicht möglich, da auf Grund der bei dieser Methode relativ umständlichen Justierung des Druckstempels auf den gewünschten Meßpunkt eine zu lange Zeitspanne zwischen dem Ende der Abkühlung und dem Beginn der Messung vergangen wäre.

Daher wurde für die Untersuchung der in 6.1 beschriebene Versuchsaufbau benutzt. Zur Messung der Hauttemperatur wurde ein elektronisches Thermometer mit Oberflächensensor und Digitalanzeige verwendet.

Die Messungen erfolgten an den Meßpunkten 6 und 11 auf Tibia bzw. Muskulatur.

Zunächst wurde die Hauttemperatur der Versuchsperson am Meßpunkt bestimmt. Die Versuchsperson tauchte den rechten Unterschenkel bis 10 cm unterhalb des Kniegelenks für etwa 10 Minuten in einen mit Eiswasser gefüllten Behälter. Dann wurde die Hauttemperatur erneut bestimmt und bei einer Temperatur von 14°C die Schmerzschwellenbestimmung zunächst auf der Tibia und dann auf der Muskulatur mit jeweils sechs Einzelmessungen durchgeführt.

Nach Beendigung der Messungen wurde die Hauttemperatur erneut fortlaufend bestimmt und bei einer Hauttemperatur von 21°C eine Wiederholung der Messungen an beiden Meßpunkten durchgeführt.

Nach Wiedererwärmung der Haut auf den Ausgangswert erfolgte eine abschließende Messung der Schmerzschwellen an den beiden Meßpunkten.

9.4. Schmerzschwellenbestimmung mit Stempelflächen verschiedener Größe

9.4.1. Ziel der Untersuchung

Es sollte überprüft werden, ob die Fläche der Druckeinwirkung einen Einfluß auf die Höhe der Schmerzschwelle hat.

9.4.2. Aufbau und Durchführung

Es wurde die in Punkt 5. beschriebene Versuchsanordnung verwendet.

Die Messungen wurden an 5 Versuchspersonen jeweils an den Meßpunkten 6 und 12 durchgeführt.

Zunächst wurde an einem Meßpunkt nach der in 7. beschriebenen Methode die Schmerzschwelle mit einer quadratischen Druckstempelfläche von 10 mm Seitenlänge bestimmt. Der Stempel war mit einer Moosgummibeschichtung zur Vermeidung von Kanteneffekten versehen. Nach Ablauf von 1 Minute wurde die Messung mit der Stempelfläche $12 \times 17\text{ mm}$ wiederholt.

Am zweiten Meßpunkt wurde ebenso verfahren.

9.5. Vergleichende Messungen mit Universalprüfmaschine und Ringkraftmesser

9.5.1. Ziel der Untersuchung

Es sollte eine Beeinflussung der Meßergebnisse im Sinne von falsch niedrigen Werten durch die auf manche Versuchspersonen doch zunächst vielleicht etwas bedrohlich wirkende Versuchsapparatur überprüft werden.

9.5.2. Aufbau und Durchführung

Die Messungen wurden an 10 Versuchspersonen beiderlei Geschlechts, jeweils an den Meßpunkten 6 und 7, durchgeführt.

Bei 5 Versuchspersonen wurden die Schwellenwerte zunächst unter Verwendung der Prüfmaschine und im Anschluß daran mit der Ringkraftmesser-Apparatur ermittelt.

Bei der anderen Hälfte der Versuchspersonen wurden die Messungen in umgekehrter Reihenfolge durchgeführt.

10. Auswertung und Darstellung der Ergebnisse

10.1. Auswertung

10.1.1. Auswertung der Druckverlaufskurven

10.1.1.1. Hauptversuch

Aus den Kurvenmaxima der während der Versuche mitgeschriebenen Druckverlaufskurven wurden die Druckwerte für die Schmerzschwellen bestimmt.

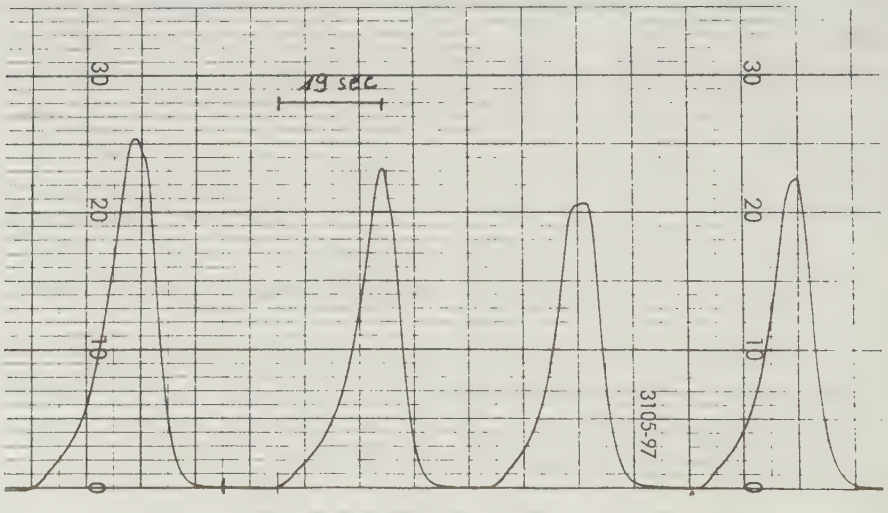


Abbildung 4 : Druckverlaufskurve mit vier Schmerzschwellenbestimmungen auf der Tibia (MP 9)

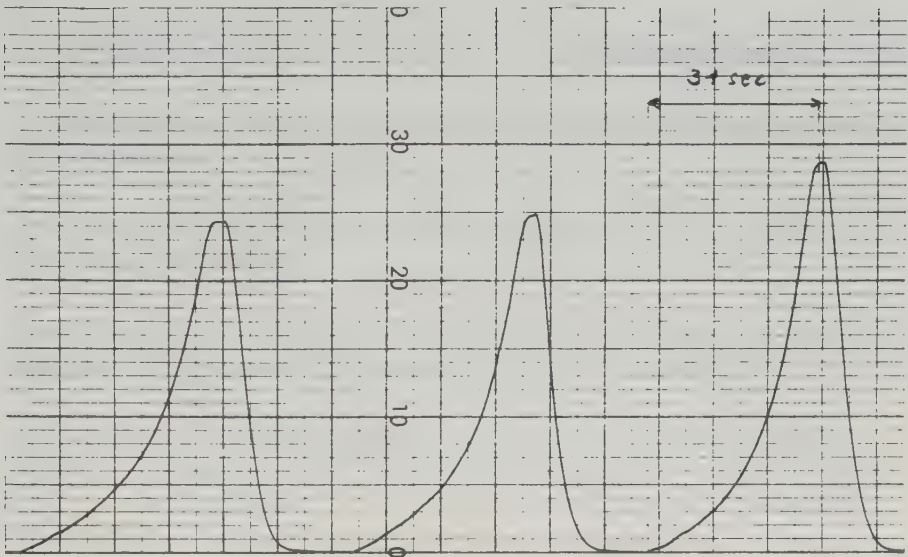


Abbildung 5 : Druckverlaufskurve mit drei Schmerzschwellenbestimmungen auf der paratibialen Muskulatur (MP10). Im Vergleich zu Abb. 4 kann man den deutlich langsameren Druckanstieg bei etwa der gleichen Schwellenhöhe erkennen

Der jeweils erste Meßwert der sechs pro Meßpunkt durchgeführten Messungen wurde ausgeklammert und nicht zur Bestimmung der Schmerzschwelle herangezogen. Aus den restlichen fünf Werten wurde der arithmetische Mittelwert ermittelt. Der arithmetische Mittelwert lieferte die Druckschmerzschwelle am jeweiligen Meßpunkt.

Die Darstellung der mit einem Druckstempel der Fläche 12x17 mm bestimmten Meßwerte erfolgte immer in N/cm^2 , bezogen auf eine wirksame Meßfläche von 2 cm^2 .

10.1.1.2. Unterschiedsschwellenbestimmung

Bei der Messung der Unterschiedsschwellen für Druck erhielt man treppenförmige Druckverlaufskurven.

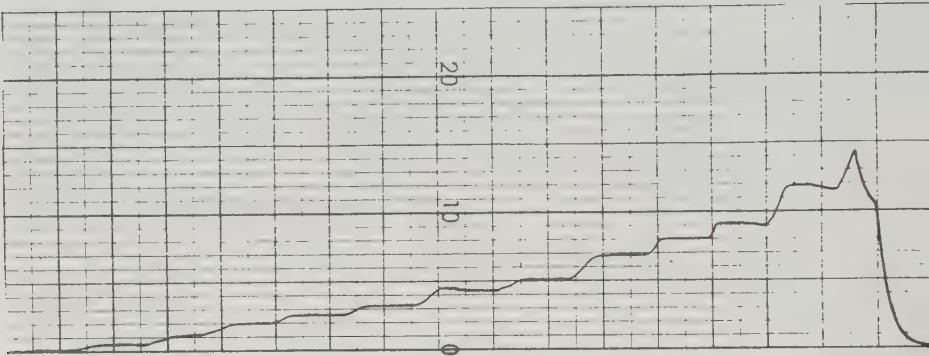


Abbildung 6 : Typische Druckverlaufskurve
bei Unterschiedsschwellen-
bestimmung

Als Unterschiedsschwellen ergaben sich die Druckdifferenzen zwischen zwei Plateaus auf der Kurve.

10.1.2. Auswertung der mittels Ringkraftmesser erhaltenen Ergebnisse

Auch mit dem Ringkraftmesser wurden die Schwellenbestimmungen an jedem Meßpunkt sechsmal durchgeführt, der jeweils erste Meßwert verworfen und aus den übrigen fünf Werten der Mittelwert gebildet.

10.2. Statistische Auswertung

10.2.1. Einzelmeßwerte

Aus den jeweils 14 Schmerzschwellenbestimmungen pro Versuchsperson wurden der Mittelwert, Standardabweichung und Variabilität ermittelt.

Ebenso wurden aus den in jeder Probandengruppe 15 Meßwerten pro Einzelmeßpunkt für alle Meßpunkte Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizient berechnet (s. Tabellen 3 u. 4).

Für die Meßpunkte 1 - 4, 5 - 9 u. 10 - 14 wurden die genannten Größen nochmals gesondert bestimmt (s. Tab. 1 u. 2).

Schließlich wurde aus den Mittelwerten der einzelnen Versuchspersonen, für Männer u. Frauen getrennt, der Gesamtmittelwert berechnet.

10.2.2. Test nach David, Pearson und Stephens

Dieser Test wurde bei allen Meßwertgruppen verwendet, bei denen der T-Test angewendet werden sollte, da mit ihm die als Voraussetzung für die Anwendbarkeit des T-Test nötige Normalverteilung der beteiligten Grundgesamtheiten überprüft werden kann.

Die Prüfgröße errechnet sich als

$$a = R/s_x$$

mit R = Variationsbreite der Meßwerte

s_x = Standardabweichung der Einzelwerte

Liegt a zwischen den durch die Irrtumswahrscheinlichkeit p u. den Stichprobenumfang festgelegten Werten für die obere und untere Schranke, so ist mit der entsprechenden Irrtumswahrscheinlichkeit zu schließen, daß die Stichprobe normalverteilt ist(48).

10.2.3. F-Test

Um die ebenfalls als Voraussetzung für den T-Test notwendige Gleichheit der Varianzen der beteiligten Grundgesamtheiten zu überprüfen, wurde der F-Test mit der Prüfgröße

$$F = \frac{s_I^2}{s_{II}^2} \quad \text{mit } s_I^2 > s_{II}^2$$

durchgeführt.

Die Nullhypothese lautet: $H_0 : s_1 = s_2 = s$

Die Zahl der Freiheitsgrade errechnet sich aus den Stichprobenumfängen minus 1.

10.2.4. T-Test für unabhängige Stichproben

Dieser Test wird zur Überprüfung der Gleichheit der Mittelwerte zweier normalverteilter Stichproben mit gleichen Varianzen herangezogen.

Die Nullhypothese lautet: $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu$

Als Prüfgröße dient die folgende Größe :

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S} \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}}$$

mit

$$S = \sqrt{\frac{(n_1 - 1) s_1^2 + (n_2 - 1) s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

Ist die Prüfgröße t kleiner als der kritische Tabellenwert t_{α} , so wird die Nullhypothese H_0 , also Gleichheit der Mittelwerte, angenommen.

Die Anzahl der Freiheitsgrade errechnet sich zu

$$f = n_1 + n_2 - 2$$

10.2.5. T-Test für abhängige Stichproben

Auch für diesen Test sind die Voraussetzungen Normalverteilung und Gleichheit der Varianzen der beteiligten Stichproben.

Die Prüfgröße lautet :

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d} \sqrt{n}$$

mit $\bar{d}$ = Mittelwert der Differenzen sich entsprechender Meßwerte aus beiden Stichproben
 s_d = Standardabweichung von d
 n = Anzahl der Wertepaare

Die Nullhypothese lautet: $H_0 : u_1 = u_2 = u$.

Sie ist abzulehnen, wenn $t > t_0$ ist.

Die Anzahl der Freiheitsgrade errechnet sich zu: $f = n - 1$

10.2.6. Friedman-Test

Mit dem Friedman-Test läßt sich die Gleichheit der Verteilungsfunktionen bzw. der zentralen Tendenzen mehrerer verbundener Stichproben überprüfen. Es wird untersucht, ob mindestens zwei von l Bedingungen für k Stichproben oder Individuen verschiedene Verteilungsfunktionen aufweisen.

Voraussetzungen für die Durchführung des Friedman-Tests sind kontinuierliche Verteilungsfunktionen und wechselseitige Unabhängigkeit der k Stichproben.

Die Prüfgröße lautet :

$$\hat{\chi}^2 = \frac{12}{n \cdot k (k + 1)} \cdot (R_1^2 + R_2^2 \dots R_k^2) - 3n \cdot (k + 1)$$

mit $R_1, R_2, \dots, R_k$ = Rangsumme des ersten, zweiten... k 'ten Meßwertes
 k = Anzahl der Stichproben
 n = Anzahl der Versuchsobjekte

Die Nullhypothese lautet :

H_0 : Alle k Stichproben entstammen der gleichen Grundgesamtheit

Ist der Wert der Prüfgröße kleiner als der kritische Wert für k u. n, so ist die Nullhypothese anzunehmen.

10.2.7. Wilcoxon-Wilcox-Test

Der Wilcoxon-Wilcox-Test ist eine multiple Rangvarianzanalyse von abhängigen Stichproben. Er wird angewendet, wenn bei Benutzung des Friedman-Tests die Nullhypothese verworfen werden mußte, also mindestens zwei der k Stichproben verschiedenen Grundgesamtheiten entstammen, um herauszufinden, zwischen welchen der k Stichproben ein signifikanter Unterschied besteht.

Als Prüfgrößen dienen die aus den verschiedenen Rangsummen der Stichproben gebildeten absoluten Differenzen D_i , die gegen den kritischen Wert D_0 für die jeweiligen Werte von n und k geprüft werden.

10.2.8. Berechnung von Regressionskoeffizienten

Als Voraussetzung für die Bestimmung des empirischen linearen Korrelationskoeffizienten für Gruppen von je zwei Wertepaaren (x,y) müssen die empirischen linearen Regressionskoeffizienten sowohl für die Regression von y auf x als auch für die Regression von x auf y berechnet werden.

Die entsprechenden Formeln lauten:

$$b_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i^2) - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

$$b_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n (y_i^2) - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}$$

mit n = Anzahl der Wertepaare

Die Achsenabschnitte a_{xy} bzw a_{yx} der zugehörigen Regressionsgeraden $y = a_{xy} + b_{xy}x$ bzw $y = a_{yx} + b_{yx}x$ ergeben sich zu

$$a_{xy} = y - b_{yx}x \quad \text{bzw} \quad a_{yx} = y - b_{xy}x$$

10.2.9. Berechnung des empirischen linearen Korrelationskoeffizienten

Der e.l.K. läßt sich nach der Formel berechnen :

$$r = \sqrt{b_{yx} \cdot b_{xy}}$$

mit r = e.l.K.

b_{yx} = lin. Regressionskoeffizient y auf x

b_{xy} = lin. Regressionskoeffizient x auf y

10.2.10. Ein-Stichproben-T-Test für den Korrelationskoeffizienten

Mit diesem Test wird geprüft, ob der nach 10.2.8. und 10.2.9. berechnete Korrelationskoeffizient von Null signifikant verschieden ist.

Die Nullhypothese lautet:

$$H_0 : r = 0$$

Die Prüfgröße t berechnet sich nach der Formel :

$$t = r \cdot \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$$

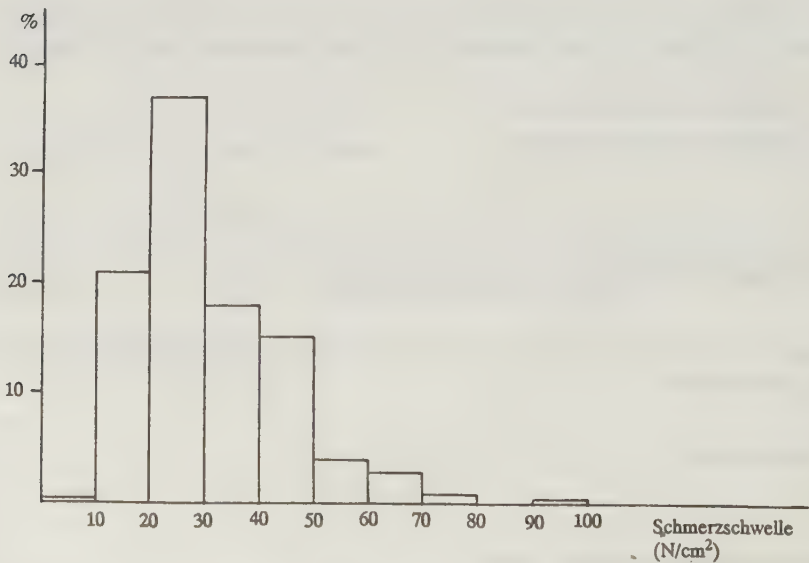
mit r = Korrelationskoeffizient
 n = Anzahl der Wertepaare

Die Nullhypothese wird verworfen, falls $t > t_0$.

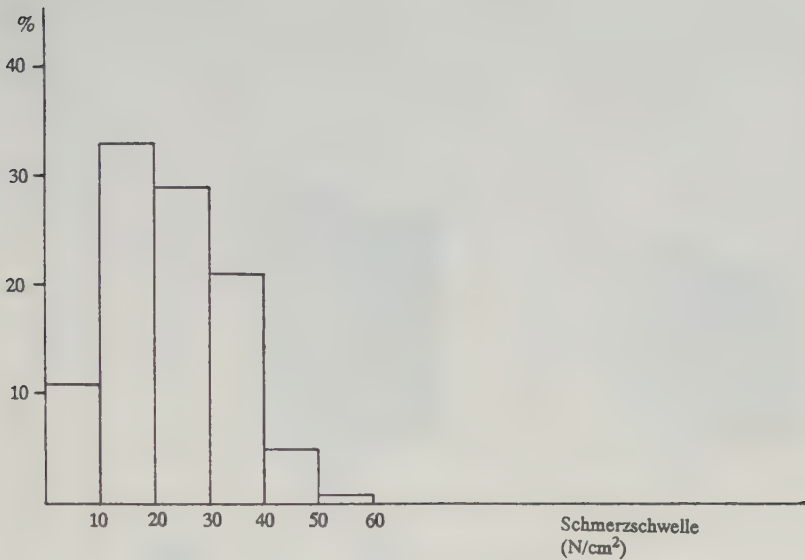
10.3. Ergebnisdarstellung

10.3.1. Streuung der Einzelmeßwerte

Die Spannweite der im Hauptversuch durchgeführten 420 Schmerzschwellenbestimmungen betrug 6,0-99,4 N/cm² in der Männergruppe und 5,8-54,0 N/cm² in der Frauengruppe(s. Kurve 1 u. 2).



Kurve 1: Verteilung der Einzelmeßwerte in der Männergruppe



Kurve 2: Verteilung der Einzelmeßwerte in der Frauengruppe

10.3.2. Durchschnittswerte für Männer- und Frauengruppe

Der Durchschnittswert für die Druckschmerzschwelle am Unterschenkel, gebildet aus den Mittelwerten der einzelnen Versuchspersonen, lag in der Männergruppe bei $31,3 \text{ N/cm}^2$ ($18,5 - 50,9$) u. in der Frauengruppe bei $22,7 \text{ N/cm}^2$ ($9,3 - 35,3$). Die Variabilität dieser Werte betrug 34 % (Männer) bzw. 36 % (Frauen).

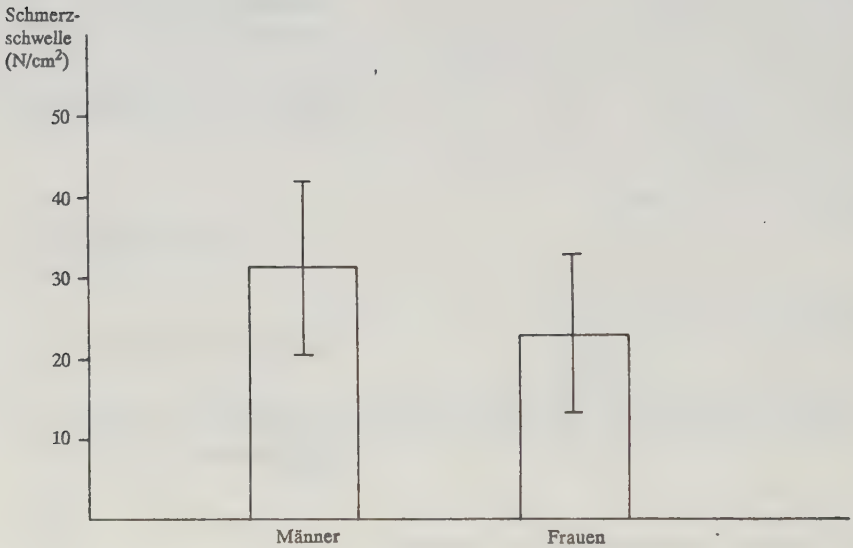
Zur Überprüfung, ob der Unterschied zwischen Männer- und Frauengruppe in der Höhe der Schmerzschwelle signifikant ist, wurde der T-Test für unabhängige Stichproben durchgeführt.

Die Voraussetzungen für seine Anwendung, Normalverteilung und Gleichheit der Varianzen, wurden mit dem Test nach David, Pearson und Stephens und dem F-Test überprüft und als gegeben ermittelt.

Die Prüfgröße t errechnete sich zu $t = 2,31$.

Für $f = 28$ und eine Irrtumswahrscheinlichkeit $p = 0,05$ lautet der kritische Wert $t_0 = 2,05$.

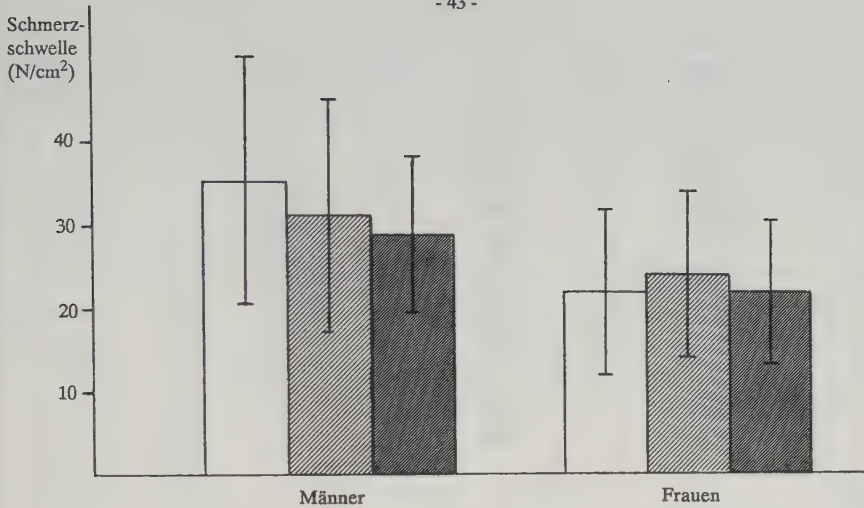
Da $t > t_0$, muß die Nullhypothese verworfen werden, d.h. mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % besteht zwischen Männer- und Frauengruppe ein signifikanter Unterschied.



Kurve 3: Geschlechtsspezifische Unterschiede der Schmerzschwellenhöhe

10.3.3. Aufschlüsselung nach Meßbereichen

Bei gesonderter Bestimmung der Mittelwerte für die Meßpunkte 1 - 4, 5 - 9 u. 10 - 14 lauteten die Ergebnisse 35,4 N/cm^2 (Sehnenbereich), 28,4 N/cm^2 (Tibia) und 31,0 N/cm^2 (Muskulatur) bei den Männern, sowie 22,2 N/cm^2 (Sehne), 21,8 (Tibia) und 23,7 (Muskulatur) bei den Frauen.



Kurve 4: Vergleich verschiedener Meßbereiche

Tibia = Muskulatur = Sehnenbereich =

Mit dem Friedman-Test wurde untersucht, ob sich die einzelnen Meßbereiche signifikant voneinander unterscheiden.

Name	x Sehne	Rang	x Tibia	Rang	x Musk.	Rang
R.W.	28,7	3	25,5	2	22,4	1
C.B.	18,3	2	22,5	3	14,7	1
T.E.	17,1	1	17,5	2	21,4	3
M.B.	20,7	3	19,2	1	20,1	2
A.T.	16,9	1	21,1	2	21,7	3
W.A.	24,1	2	16,5	1	25,0	3
P.F.	34,0	3	29,5	2	26,6	1
B.S.	45,1	3	25,0	1	27,5	2
H-P.F.	32,2	2	27,2	1	33,5	3
A.E.	37,7	3	35,6	2	31,3	1
H.H.	59,1	3	27,8	1	28,7	2
E.R.	44,4	2	45,9	3	36,5	1
B.K.	60,5	3	43,2	2	36,1	1
W.H.	53,9	2	28,3	1	71,2	3
K.G.	38,4	1	41,2	2	47,2	3
Rang- summe		34		26		30

Tafel 1: Rangsummen Meßbereiche Männer

Name	$\bar{x}$ Sehne	Rang	$\bar{x}$ Tibia	Rang	$\bar{x}$ Musk.	Rang
U.L.	8,5	1	8,9	2	10,8	3
M.D.	23,0	3	17,1	2	8,9	1
J.A.	40,6	3	27,6	1	35,1	2
K.S.	16,8	1	17,3	2	22,0	3
J.P.	17,9	1	32,0	2	34,8	3
M.B.	14,7	1	16,7	2	18,8	3
S.G.	15,0	2	12,4	1	17,0	3
S.S.	32,1	1	37,4	3	35,8	2
H.M.	25,5	1	27,5	2	33,3	3
M.F.	34,7	2	38,1	3	24,7	1
B.K.	9,5	1	11,7	3	9,5	2
U.H.	12,3	1	28,5	2	30,6	3
S.B.	35,8	3	24,3	1	26,6	2
A.P.	25,8	3	14,6	1	15,2	2
B.D.	20,8	2	18,8	1	32,7	3
Rang- summe		26		28		36

Tafel 2: Rangsummen Meßbereiche Frauen

Aus den Tafeln 1 und 2 erhält man als Werte der Prüfgröße X :

$$X = 2,13 \quad (\text{Männer})$$

$$X = 3,73 \quad (\text{Frauen})$$

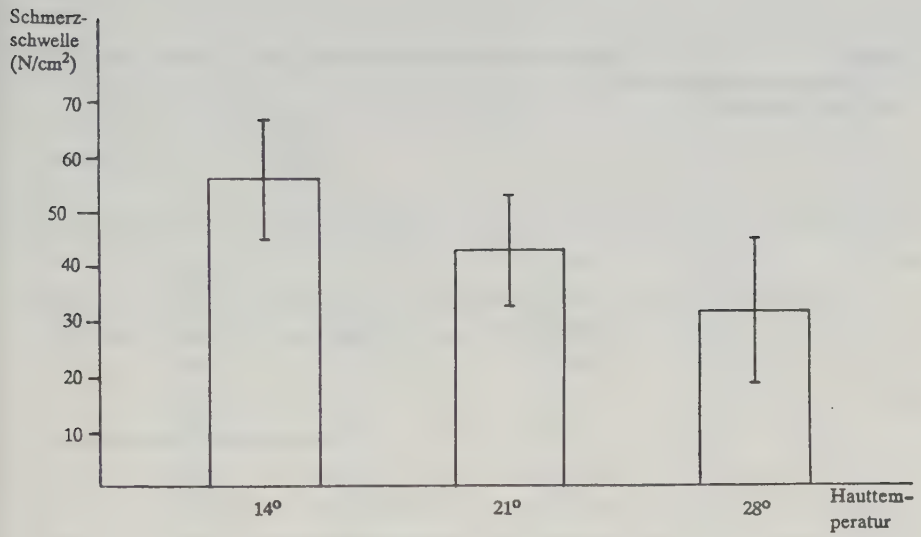
Für $n = 15$ und $k = 3$ lautet der kritische Tabellenwert $X_0 = 6,40$ ($p=0,05$) bzw. $X_0 = 8,93$ ($p=0,01$).

Da beide Prüfgrößen kleiner als der kritische Wert sind, ist die Nullhypothese anzunehmen.

Zwischen den Schmerzschwellenwerten von Sehnenbereich, Tibia und Muskulatur wurden keine signifikanten Unterschiede gefunden.

10.3.4. Schmerzschwellen bei erniedrigter Hauttemperatur

Bei Abkühlung der Hautoberfläche von 28°C auf 14°C erhöhte sich der aus 12 Messungen gebildete Mittelwert der Schmerzschwelle von 30 N/cm^2 auf 56 N/cm^2 . Bei Wiedererwärmung der Haut auf 21°C sank er auf 43 N/cm^2 , um bei Erreichen der Ausgangshauttemperatur einen Wert von 32 N/cm^2 , also in etwa den Ausgangswert, anzunehmen (s. Tabelle 6 im Anhang).



Kurve 5: Veränderung der Schmerzschwelle bei erniedrigter Hauttemperatur

Mit Hilfe des Friedman-Tests wurde überprüft, ob die Veränderungen der Schmerzschwellenhöhe signifikant waren.

Tafel 3 :
Rangsummen der Schwellenwerte bei
erniedrigter Hauttemperatur

Name	MP	28	R	14	R	21	R	28	R
P.R.	6	36,6	2	70,3	4	51,5	3	29,7	1
	11	75,9	3	58,6	1	66,4	2	80,2	4
A.T.	6	24,5	1	74,5	4	53,2	3	39,7	2
	11	32,7	2	60,8	4	41,9	3	28,1	1
P.F.	6	38,3	4	35,8	3	33,3	2	29,4	1
	11	20,2	1	47,4	4	36,5	3	25,7	2
A.T.	6	31,5	2	56,4	4	40,5	3	25,4	1
	11	30,0	1	63,7	4	47,1	3	38,3	2
B.D.	6	18,2	1	51,3	4	44,4	3	21,1	2
	11	27,8	2	60,7	4	42,9	3	25,6	1
A.P.	6	13,9	1	42,2	4	28,4	3	20,9	2
	11	14,7	1	50,9	4	34,3	3	18,8	2
Rang- summe			21		44		34		21

Mit den Rangsummen aus Tafel 3 erhält man als Prüfgröße

$$X = 18,7$$

Für $n = 12$ und $k = 4$ lautet der kritische Wert $X_0 = 7,70$ ($p = 0,05$) und $X_0 = 10,68$ ($p = 0,01$).

Da die Prüfgröße X größer als beide kritischen Werte ist, kann mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% und 1 % geschlossen werden, daß die Nullhypothese abzulehnen ist.

Mindestens zwei der vier Stichproben entstammen verschiedenen Grundgesamtheiten.

Um zu ermitteln, zwischen welchen der vier Stichproben ein signifikanter Unterschied besteht, wurde der Wilcoxon-Wilcox-Test benutzt.

Als Prüfgrößen ergaben sich aus Tafel 3 folgende Rangsummendifferenzen :

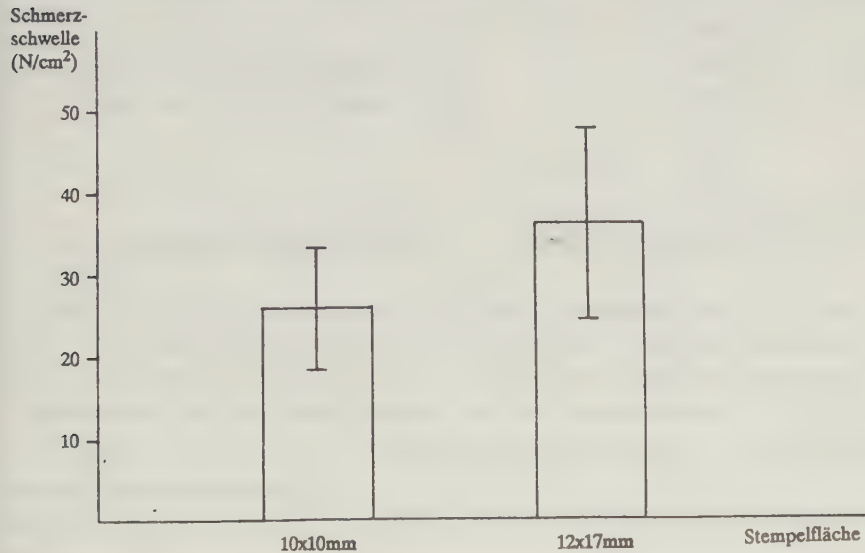
$$\begin{array}{lll} D_1 = 23 (R_1/R_2) & D_3 = 10 (R_2/R_3) & D_5 = 23 (R_2/R_4) \\ D_2 = 13 (R_1/R_3) & D_4 = 13 (R_3/R_4) & \end{array}$$

Der kritische Wert für $n = 12$ und $k = 4$ lautet $D_0 = 16,2$ ($p = 0,05$) und $D_0 = 19,7$ ($p = 0,01$).

Zwischen der Schwelle bei Ausgangs- bzw. Endhauttemperatur und der Schwelle bei einer Hauttemperatur von 14°C besteht also ein auf einem Signifikanzniveau von 99 % signifikanter Unterschied.

10.3.5. Verschiedene Druckstempelflächen

Der Mittelwert aus 10 Schmerzschwellenbestimmungen mit einer Druckstempelfläche von $10 \times 10 \text{ mm}$ betrug $26,2 \text{ N/cm}^2$ ($v = 29 \%$), mit einer Stempelfläche von $17 \times 12 \text{ mm}$ erhielt man einen Wert von $36,4 \text{ N/cm}^2$ ($v = 33 \%$) bei den gleichen Versuchspersonen (s. Tab. 7 im Anhang).



Kurve 5: Veränderung der Schmerzschwelle bei Vergrößerung der Druckfläche

Bei Durchführung des T-Tests für abhängige Stichproben erhielt man als Wert der Prüfgröße $t = 5,1$. Da der kritische Wert t_0 bei 8 Freiheitsgraden und einer Irrtumswahrscheinlichkeit $p = 0,01$ $t_0 = 3,36$ beträgt, also kleiner ist als die Prüfgröße, muß die Nullhypothese verworfen werden.

Der Unterschied der Meßwerte bei verschieden großen Stempelflächen ist signifikant.

10.3.6. Follow up - Untersuchung

Für die Überprüfung, ob die bei der Nachmessung nach vier Monaten festgestellten Schmerzschwellenwerte einen signifikanten Unterschied zur Vormessung zeigen, wurde für jede der 5 Versuchspersonen der T-Test für abhängige Stichproben angewendet.

Die Voraussetzung für seine Durchführung, Normalverteilung der Stichproben, wurde mit dem Test nach David, Pearson und Stephens als gegeben ermittelt ($p = 0,025$).

Die Prüfgrößen der einzelnen Versuchspersonen ergaben sich aus Tabelle 5 (im Anhang) zu :

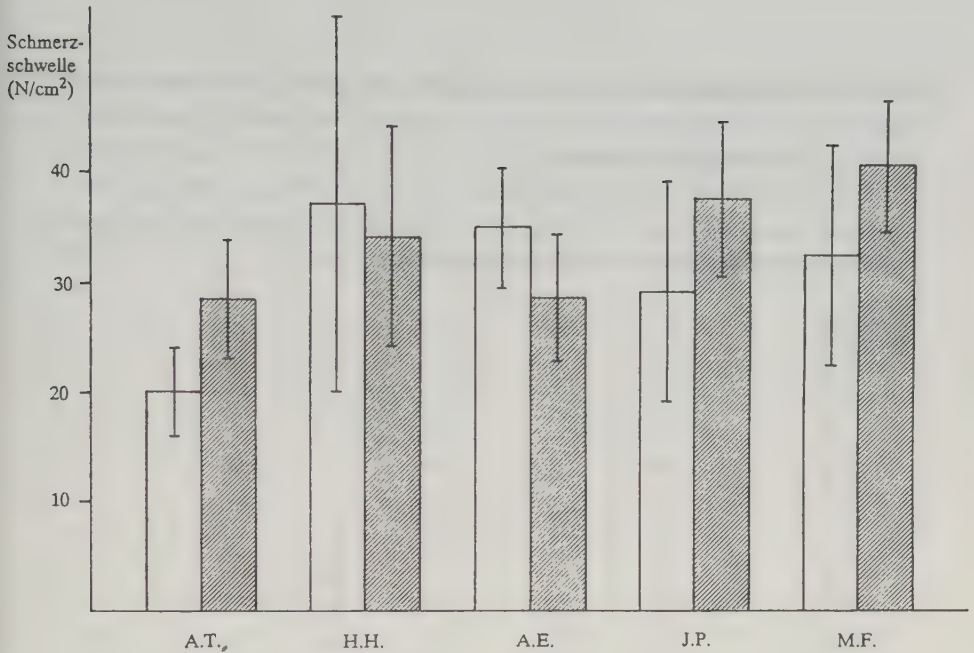
A.T.	$t = 3,89$
H.H.	$t = 0,85$
A.E.	$t = 3,44$
J.P.	$t = 2,52$
M.F.	$t = 3,92$

Für eine Irrtumswahrscheinlichkeit $p = 0,05$ und $f = 13$ Freiheitsgrade lautet der kritische Wert t_0 :

$$t_0 = 2,16$$

Die Nullhypothese ist anzunehmen, wenn $t > t_0$ ist.

Bei vier der fünf Versuchspersonen war daher der Unterschied zwischen erster und zweiter Messung signifikant.



Kurve 7: Follow up-Messung nach vier Monaten

Erstmessung =  Zweitmessung = 

10.3.7. Vergleich Prüfmaschine - Ringkraftmesser

Die Mittelwerte der bei neun Versuchspersonen an je zwei Meßpunkten durchgeführten Vergleichsmessungen zwischen Ringkraftmesser und Prüfmaschine lauten $36,3 \text{ N/cm}^2$ ($v = 27\%$) für die Prüfmaschine und $26,9 \text{ N/cm}^2$ ($v = 27\%$) für den Ringkraftmesser.

Zur Überprüfung, ob der Unterschied in der Schmerzschwellenhöhe signifikant ist, wurde der T-Test für abhängige Stichproben angewendet.

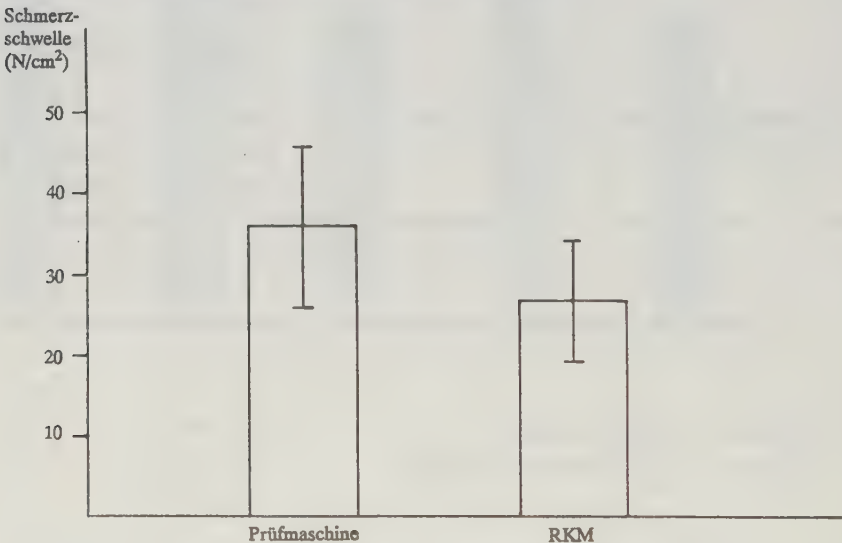
Die Normalverteilung beider Stichproben wurde mit dem Test nach David, Pearson und Stephens überprüft.

Die Prüfgröße t errechnete sich zu 4,84.

Für $f = 17$ Freiheitsgrade und eine Irrtumswahrscheinlichkeit $p = 0,0005$ lautet der kritische Wert $t_0 = 3,96$.

Da $t > t_0$, ist die Nullhypothese abzulehnen.

Die mittels Ringkraftmesser ermittelten Werte für die Schmerzschwelle sind auf einem 99,95 %-Niveau signifikant niedriger als die mittels Prüfmaschine ermittelten Werte.



Kurve 8: Mittelwerte der Schwellenbestimmungen mittels Ringkraftmesser (RKM)
bzw. Prüfmaschine

10.3.8. Bestimmung der Unterschiedsschwellen für Druck

Die bei 10 Versuchspersonen ermittelten Unterschiedsschwellen für Druck schwankten in der Größe, abhängig von der Höhe des Ausgangsdruckwertes, zwischen 0,5 und 5 N/cm². Die Zahl der Unterschiedsschwellen von der Absolutschwelle für Druck bis zum Erreichen der Schmerzschwelle lag zwischen 6 und 20.

Geschlechtsspezifische Unterschiede bezüglich Anzahl oder Größe der Unterschiedsschwellen waren nicht festzustellen.

Um zu überprüfen, ob die Zunahme der Unterschiedsschwellen dem Weber-Fechner'schen Gesetz folgt, d.h. ob ein lineares Anwachsen der Unterschiedsschwellen in Abhängigkeit von der Höhe des Ausgangsdruckwertes erfolgt, wurden für alle Versuchspersonen die Regressionskoeffizienten und der Korrelationskoeffizient bestimmt und mittels T-Test die statistische Signifikanz der Korrelation überprüft (s. Tafel 4).

Name	b_{yx}	b_{xy}	r	f	t	t_0	p
J.P.	0.78	1.23	0.98	4	9.85	8.61	0.9995
E.R.	20.07	8.80	0.80	18	5.66	3.92	0.9995
B.K.	0.02	2.05	0.50	5	1.29	-	-
HPF.	0.09	7.05	0.80	11	4.42	4.03	0.999
A.E.	0.18	4.67	0.92	12	8.13	4.32	0.9995
K.G.	0.27	3.48	0.97	4	7.98	7.17	0.999
A.T.	0.19	4.05	0.88	8	5.24	5.04	0.9995
M.B.	0.01	5.40	0.16	11	0.53	-	-
K.S.	0.09	7.47	0.82	6	3.51	3.14	0.99
C.B.	0.15	5.60	0.92	10	8.06	4.59	0.9995

Tafel 4: Regressions- u. Korrelationskoeffizienten, sowie Prüfgröße t für die Unterschiedsschwellen

Bei acht der zehn Versuchspersonen hatte der Korrelationskoeffizient einen Wert über 0,8, und war mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von durchschnittlich 0,001 (s. Tafel 4) hochsignifikant, d.h. bei dem überwiegenden Teil der Versuchspersonen bestand zwischen den Unterschiedsschwellen und dem Ausgangsdruckwert eine lineare Beziehung nach der Formel $d/I = C$.

11. Diskussion

11.1. Variabilität der Meßergebnisse

11.1.1. Intraindividuelle Variabilität

Follow up-Messungen im Zeitraum von Sekunden bis wenigen Minuten ergaben Kurzzeitvariabilitäten von 15 - 18% am einzelnen Meßpunkt, mit maximalen Abweichungen von -47% bis + 59 % vom ersten Meßwert, wobei sich keine Anzeichen von Adaptation erkennen ließen. Die Langzeitvariabilität bei Nachmessungen nach Ablauf von 3 - 4 Monaten betrug am einzelnen Meßpunkt bis 53%, mit Extremen von - 58% bis + 178% Abweichung vom jeweils ersten Meßwert.

Bezogen auf den Durchschnittswert pro Versuchsperson lag die Langzeitvariabilität bei 12 - 24% (siehe Tabelle 5).

In der Literatur variieren die Angaben über die intraindividuelle Variabilität beträchtlich. Die geringste Variabilität scheint bei Verwendung von Hitzestrahlung bzw. elektrischen Impulsen als Stimulus für die Schwellenbestimmung vorzuliegen.

Chapman und Jones, die die Schmerzschwelle bei Applikation von Hitzestrahlung untersuchten, berichten über Variabilitäten von 2 - 6% (6).

Hardy, Wolff und Goodell erhielten unter Anwendung desselben Stimulus Unterschiede von bis zu 12% für die Schmerzschwelle (30).

Bei elektrischer Reizung der Haut erhielt Lanier eine Korrelation von 0.55 zwischen den Meßwerten (39), während Notermans bei 40 Messungen im Abstand von jeweils 20 Sekunden über Abweichungen von - 20% bis + 11% von einem Mittelwert berichtet (42). Die Variabilität der Schwelle der Vibrationsempfindung der Haut wird von Goldberg und Lindblom (20) bei dreimaliger Bestimmung mit 10 - 15% angegeben. Fagius und Wahren, die ebenfalls die Schwellenwerte für die Vibrationsempfindung und zusätzlich für Druck und Temperatur untersuchten, erhielten Kurzzeitvariabilitäten innerhalb von Minuten von 8 - 18%. Bei Nachmessungen nach einigen Monaten fanden sie Langzeitvariabilitäten mit Extremen von - 90% bis + 256% Unterschied zur ersten Messung (13).

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung bewegen sich damit also durchaus im Rahmen der bei Untersuchung der Schwellen von anderen Hautsinnesmodalitäten ermittelten Variabilitäten.

Über Schwellenbestimmungen der Druckschmerzempfindung existieren in der Literatur nur sehr spärliche Daten. Merskey und Spear, die die Druckschmerzschwellen an der Haut der Stirn und, wie in der vorliegenden Untersuchung, des Unterschenkels ermittelten, gaben als Maß für die Variabilität ihrer Messungen den Quotienten aus dem Ergebnis der Follow up-Untersuchung und der ersten Messung an. Sie erhielten Werte zwischen 0.98 ± 0.25 und 1.02 ± 0.22 (46).

Die Werte der vorliegenden Arbeit liegen bei Anwendung derselben Umrechnung bei 1.22 ± 0.47 ($v = 38\%$), also geringfügig höher.

Die Ursache dieses Unterschiedes dürfte zum Einen in der Verwendung einer wesentlich größeren Stempelfläche (2 cm^2 gegenüber 0.2 cm^2 bei Merskey und Spear) und zum Anderen in der Benutzung der Polsterung zu finden sein, da sich bei Vormessungen ohne Polsterung neben wesentlich niedrigeren Schwellenwerten auch bedeutend geringere Variabilitäten ergeben hatten.

11.1.2. Interindividuelle Variabilität

Die Variabilität zwischen den einzelnen Versuchspersonen lag bei der vorliegenden Untersuchung bei einem Vergleich der Einzelmesspunkte für die Männergruppe im Mittel bei 44% (31% - 61%), für die Frauengruppe bei 47% (36% - 57%).

Vergleicht man die aus den jeweils 14 Einzelmessungen gebildeten Durchschnittswerte der Versuchspersonen, erhält man bei den Männern eine Variabilität von 34%, bei den Frauen von 36%.

Der Variationskoeffizient der Untersuchungen von Merskey und Spear lag bei 22% für die Männer und 33% für die Frauen (46). Keele, der die gleiche Versuchsanordnung wie Merskey und Spear, das Druckalgometer, benutzte, erhielt für die Druckschmerzschwelle an der Stirn Werte zwischen 0.5 und 6.0 kg, mit einem Mittelwert von 2,0 kg, also bis zu 200% Abweichung vom Mittelwert (35).

Bei Bestimmung der Schmerzschwelle durch Reizung der Haut mit elektrischen Impulsen wurden Variabilitäten um 50% ermittelt (39,42), während die Schmerzschwelle bei Anwendung von Hitzestrahlung als Stimulus Variabilitäten in einem Bereich von 5 - 55% zeigt (6,9,30).

Damit zeigen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit auch für die interindividuelle Variabilität keine höheren Werte als die der meisten anderen psychophysikalischen Schmerzschwellenbestimmungen an der Haut.

11.1.3. Mögliche Ursachen der hohen Streuung

Die Angaben in der Literatur über die Variabilität von Schmerzschwellenmessungen weisen beträchtliche Schwankungen auf. Kaum eine Arbeit gibt Werte unter 15% an. Als mögliche Ursachen dieser hohen Streuung kommen viele Faktoren in Frage.

Eine der Einflußgrößen ist sicherlich die Art des für die Messung verwendeten Stimulus. Die geringste Variabilität wird bei thermischer Stimulation durch Applikation von fokussierten Lichtstrahlen ("radiant heat") angegeben (6,9,30), während sowohl bei elektrischer als auch mechanischer Reizung wesentlich höhere Variabilitäten auftreten (30,39,42,46). Die Ursache dieser Unterschiede ist noch weitgehend ungeklärt. Möglicherweise liegt sie in der Übertragung der afferenten Impulse durch zwei unterschiedliche Arten von Nervenfasern, den schnell leitenden, myelinisierten Ad- sowie den langsamen, unmyelinisierten C-Fasern (24)(siehe auch Kap. 2.). Dies würde sich mit der Beobachtung decken, daß der durch Hitzestrahlung erzeugte Schmerz eher hellen, stechenden Charakter besitzt, während Druckreize dumpfen, brennenden Schmerz verursachen.

Eine weitere mögliche Erklärung ist die Fokussierbarkeit der Hitzestrahlung, die es erlaubt, punktförmige Schmerzreize zu setzen, im Gegensatz zu mechanischen und elektrischen Stimuli, die einen mehr flächenhaften Charakter besitzen, damit eine größere Anzahl von Nociceptoren erregen, deren sensorischer Input schon an den ersten Umschaltstellen im Rückenmark multiplen Summations- und Integrationsprozessen ausgesetzt ist, was die Quantifizierbarkeit der Empfindungsstärke wesentlich reduzieren dürfte, und die höheren Schwankungen der Meßwerte bewirken könnte.

Bei der vorliegenden Untersuchung wird dieser Effekt wahrscheinlich noch durch die Beschichtung des Druckstempels vergrößert, da hierdurch einerseits zwar überhöhte Werte durch Kanteneffekte verhindert, andererseits aber auch eine klare Abgrenzung des dem Stempeldruck ausgesetzten Gebietes gegenüber dem umgebenden Gewebe vermieden wird.

Weiterhin ist die Absolutschwelle für Schmerz bei der Verwendung von Strahlungshitze für die Versuchsperson wesentlich einfacher zu bestimmen, da bei der Applikation einzelner Stimuli steigender oder fallender Intensität der Übergang von über- zu unterschwelligen Reizen und umgekehrt viel deutlicher ist, als bei einer kontinuierlichen Stimuluszunahme, bei der zunächst eine andere Sinneswahrnehmung hervorgerufen wird, die allmählich ohne einen "harten" Übergang die Schwelle zur Schmerzwahrnehmung überschreitet.

Die Hauptursache für die Höhe der Variabilität von Schwellenmessungen an der Haut wird allgemein in der zentralen Verarbeitung der afferenten Impulse gesehen und dürfte damit mehr von psychologischen als von physiologischen Faktoren abhängen.

Der entscheidende Faktor für die Höhe der Schmerzschwelle einer bestimmten Versuchsperson bei einer experimentellen Schwellenbestimmung ist wahrscheinlich deren persönliche Einstellung ("attitude") gegenüber dem Experiment. Rey (1943) berichtet von einer wesentlich größeren Streuung der Ergebnisse algesimetrischer Untersuchungen als der Ergebnisse für die Schwellenbestimmung von Druck bei derselben Versuchsperson. Diesen Unterschied führt er auf die Veränderung der Motivation zurück, die erfolgt, sobald eine Versuchsperson weiß, daß sie an einer Schwellenbestimmung für Schmerz teilnimmt (24).

Grünenwald konnte eine deutliche Erhöhung der Schmerzschwelle durch positive Motivation erzielen(23), und v. Graffenried, der mittels psychologischer Testverfahren den Einfluß von Ängstlichkeit bzw. der Neigung, sich selbst beweisen zu müssen, auf die experimentelle Schmerzmessung untersuchte, erhielt hochsignifikante Werte für die Beeinträchtigung der Meßergebnisse durch Angst oder Durchhaltedenken und zweifelt daher generell die Möglichkeit an, bei experimentellen Schmerzuntersuchungen zuverlässige Werte zu erhalten, da "die Ängstlichkeit intra- und interindividuell in einer unvorhersagbaren und unkontrollierbaren Weise schwankt" (22).

Um einer Verfälschung der Meßergebnisse durch etwa bestehende Ressentiments der Versuchspersonen gegenüber der möglicherweise etwas bedrohlich wirkenden Untersuchungsapparatur (s. Abbildung 1) entgegenzuwirken, wurde durch einen Probedurchgang vor Beginn der eigentlichen Messungen versucht, mögliche Angstgefühle abzubauen.

Ein direkter Vergleich zwischen Prüfmaschine und der von Schaff für Vorarbeiten verwendeten Meßapparatur mit Ringkraftmesser, durch Schmerzschwellenbestimmungen an je zwei Meßpunkten bei neun Versuchspersonen, zeigte jedoch signifikant höhere Werte für die Schmerzschwelle bei Verwendung des Ringkraftmessers (s. Tabelle 8). Auf Grund dieses Ergebnisses kann davon ausgegangen werden, daß die verwendete Versuchsapparatur keinen steigenden Einfluß auf die Ängstlichkeit der Probanden hatte und somit auch nicht zu falsch niedrigen Schwellenwerten führte.

Hardy, Wolff und Goodell berichten bei der Untersuchung von Einflußfaktoren auf das Versuchsergebnis u. a. folgende Resultate :

- "1. Ablenkung durch lautes Vorlesen von Geschichten möglichst spannender Art hebt die Schmerzschwelle um 16% an.
2. Autosuggestion "Ich werde keinen Schmerz spüren" hob sie um 20% an.
3. Ein klirrendes Geräusch hob sie um 38% an." (24)

Durch die Durchführung der Untersuchungen in einem schallarmen, abgeschlossenen Raum und die sorgfältige Instruktion der Versuchspersonen wurde versucht, den Einfluß von derartigen Störfaktoren möglichst gering zu halten.

Dennoch läßt sich bei einer durchschnittlichen Untersuchungsdauer von über einer Stunde eine ständig gleichbleibende Konzentration der Versuchspersonen sicher nicht erreichen, was wohl zu der relativ hohen Variabilität beigetragen hat.

Als weiteren Faktor, der die Meßergebnisse beeinflussen und die Variabilität erhöhen könnte, nennen Chapman und Jones psychische Ermüdung und Nervosität (6), Faktoren, die durch dahingehende Befragung der Versuchspersonen vor Beginn der Untersuchung zwar einzuschränken versucht wurde, die aber letztendlich doch sehr schlecht zu beeinflussen sind.

Physische Ermüdung und andere körperliche Faktoren wie 48-stündiges Fasten, Azidose und Alkalose zeigen dagegen nach ihren Untersuchungen keinen Einfluß auf die Höhe der Schmerzschwelle.

Auch rassische Unterschiede der Schmerzschwellenhöhe wurden gefunden. Bei Negern und Orientalen fanden sich in verschiedenen Untersuchungen niedrigere Schmerzschwellenwerte, als bei der weißen Vergleichsgruppe(6,58). Ob es sich dabei jedoch wirklich um rassisch bedingte Unterschiede handelt, ist fraglich. Nach Melzack (44) dürften eher kulturelle Unterschiede die entscheidende Rolle bei der Ausprägung der Reaktionsweisen auf schmerzzeugende Reize spielen.

Als Ursache erhöhter Streuung dürften bei der vorliegenden Untersuchung kulturelle Unterschiede keine Rolle spielen, da es sich bei allen Versuchspersonen um Mitteleuropäer handelte.

Auf Grund der großen Anzahl persönlichkeitsabhängiger und situationsbedingter psychologischer und, zu geringeren Teilen, auch physiologischer Einflußgrößen, die sich nur sehr bedingt kontrollieren bzw. eliminieren lassen, wird die Höhe der Unterschiede der Schmerzempfindlichkeit zwischen den verschiedenen Versuchspersonen und innerhalb der Versuchspersonen verständlich.

11.2. Räumliche Unterschiede der Schmerzempfindlichkeit am Unterschenkel

Bei dem Vergleich der drei Meßbereiche Endsehnen der Muskuli tibialis anterior und extensor hallucis longus am distalen Tibiaende (repräsentiert durch die Meßpunkte 1 - 4), Vorderkante der Tibia (Meßpunkte 5 - 9) und paratibiale Muskulatur (Meßpunkte 10 - 14) mit Hilfe des Friedman-Tests (siehe 9.2.5.)

ergaben sich keine statistisch signifikanten Unterschiede bezüglich der aus den jeweiligen Meßpunkten gebildeten Mittelwerte pro Meßbereich (s. Tabellen 1 u. 2).

Zwar zeigten sich bei den einzelnen Versuchspersonen oft erhebliche Schwankungen der Meßwerte an den Einzelmeßpunkten, auch innerhalb eines Meßbereichs. Bezogen auf die Gesamtheit der Probanden war jedoch keine Systematik dieser Schwankungen zu erkennen.

Bei Berechnung der Durchschnittswerte pro Einzelmeßpunkt aus der Gesamtheit von jeweils 15 Versuchspersonen ergab sich nach Bildung des Mittelwertes aus diesen 14 resultierenden Durchschnittswerten pro Probandengruppe eine Variabilität von 12% für die Männer und 8% für die Frauen, erstaunlich niedrige Werte im Vergleich zu den Variabilitäten der Einzelmeßpunkte pro Versuchsperson, die im Bereich von 15 - 46% lagen (vergl. Tabelle 3 u. 4, senkrechte Spalten).

Die Vermutung liegt nahe, daß die Schwankungen der Werte bei den Einzelmeßpunkten zufällig verteilt sind und auf der hohen Re-Test-Variabilität des Meßverfahrens beruhen.

Auf Grund dieser Tatsache läßt sich die angestrebte Topographie der Druckschmerzempfindlichkeit am Unterschenkel nicht erstellen. Es ist anzunehmen, daß bei einer gesunden Person, ohne Verletzungen oder Vorerkrankungen im Bereich des Unterschenkels, keine wesentlichen Schwankungen in der Druckschmerzschwelle entlang des Unterschenkels vorliegen.

Erstaunlich ist die Feststellung, daß sich weder zwischen Tibia und Sehnenbereich noch zwischen Tibia und Muskulatur ein statistisch signifikanter Unterschied finden ließ, die in deutlichem Widerspruch zu der im täglichen Leben oft gemachten Beobachtung einer erheblich niedrigeren Schmerzschwelle der Schienbeinvorderseite steht.

Die Ursache dieses Widerspruchs dürfte die Verwendung einer Moosgummibeschichtung für den Druckstempel sein. Diese war vorgenommen worden, um einerseits eine bessere Simulation der im Skistiefel herrschenden Verhältnisse und andererseits eine Vermeidung von Kanteneffekten durch den planen Metallstempel und eine homogenere Druckverteilung unter der gesamten Stempelfläche mit Vermeidung von punktuellen Druckspitzen zu erreichen, die das Meßergebnis in Richtung auf wesentlich niedrigere Werte für die Schmerzschwelle verschoben hätten.

Vormessungen ohne die dämpfende Moosgummibeschichtung ergaben nämlich sowohl eine Erniedrigung der Schmerzschwelle über allen Meßpunkten als auch den zu erwartenden deutlichen Unterschied zwischen Tibia einerseits und Muskulatur/Sehnengewebe andererseits.

Durch die Kompression der Moosgummibesichtung und die dadurch erreichte gleichmäßigere Belastung der Tibia beim Druckanstieg wird die geringere Elastizität und Komprimierbarkeit der Tibia gegenüber den Weichteilen sowie ihre abgerundete Form, die kein völlig planes Aufliegen des Druckstempels gestattet, also so weit kompensiert, daß Tibia, Sehngewebe und Muskulatur in etwa die gleiche Schmerzschwellengröße aufweisen. Dies ist auch für die Verhältnisse im Skistiefel von Bedeutung, da hier durch Verwendung von dämpfenden Innenschuhmaterialien gleichfalls eine Homogenisierung der Schmerzempfindlichkeit erreicht werden dürfte.

Beim Sehnenbereich ist zu bedenken, daß hier trotz etwa derselben Höhe der Schmerzschwelle wie bei den anderen Bereichen wohl doch insofern eine höhere Empfindlichkeit vorliegt, als bei längerdauernder Reizung des Sehngewebes durch für eine akute Schmerzempfindung unterschwellige Druckwerte ein sehr schmerzhafter chronischer Reizzustand im Sinne einer Tendopathie oder Tendovaginitis resultieren kann. Zur Verminderung dieser Gefährdung könnte beispielsweise eine verstärkte Polsterung des Stiefels im oberen Ristbereich einen wichtigen Beitrag leisten.

11.3. Geschlechtsspezifische Unterschiede der Schmerzschwellen

Durch Anwendung des Mann-Whitney-Wilcoxon Tests für unverbundene Stichproben konnte gezeigt werden, daß die Schmerzschwellenwerte der Frauengruppe signifikant niedriger waren als die der Männergruppe.

Dieses Ergebnis stimmt überein mit Messungen von Sherman (1943), der bei der Untersuchung der Schwelle für Druckschmerz an der menschlichen Stirn fand, daß die weiblichen Probanden eine um etwa 30% niedrigere Schmerzschwelle aufwiesen als ihre männlichen Kollegen (55). Della Corte berichtet bei Untersuchung der Schmerzschwelle für Hitzestrahlung über eine etwa 18% höhere Schwellenergie bei Männern, und auch Merskey und Spear erhielten signifikant niedrigere Schmerzschwellen bei Frauen (9,45).

Chapman und Jones fanden zwar eine etwas höhere Schmerzschwelle bei den männlichen Probanden, die jedoch nicht ausgeprägt genug war, um statistisch signifikant zu sein(6), ebenso wie Notermans (41) bei elektrischer Schmerzschwellenbestimmung, während Steiness (57) bei Bestimmung der Schwelle der Vibrationsempfindung keine Unterschiede zwischen den Geschlechtern ermittelten.

Es wäre zu fordern, daß dem Umstand der höheren Schmerzempfindlichkeit der weiblichen Skifahrer bei der Konstruktion bzw. Klassifikation der Skistiefel Rechnung getragen wird, beispielsweise indem eine

eindeutige Einteilung der Stiefel in Damen- und Herrenstiefel erfolgt, wobei in den Damenstiefeln nur entsprechend niedrigere Druckspitzenwerte erlaubt sein sollten.

11.4. Veränderung der Schmerzschwelle bei erniedrigter Hauttemperatur

Mit Hilfe der Rangvarianzanalyse nach Friedman und des Wilcoxon-Wilcox-Tests (s. 10.2.7.1. u. 10.2.7.2.) konnte gezeigt werden, daß sich die Druckschmerzschwelle bei Abkühlung der Haut von 28° C auf 14° C statistisch signifikant erhöhte.

Der Mittelwert der Schmerzschwellenbestimmungen von sechs Versuchspersonen stieg um ca 85% gegenüber dem Ausgangswert an. Bei Wiedererwärmung der Haut auf 21° C war die Schmerzschwelle immer noch um 43% höher als der Anfangswert, ohne daß der Unterschied jedoch statistisch signifikant war, und sank nach Erreichen der ursprünglichen Hauttemperatur von ca. 28° C auf einen Wert, der in etwa dem Anfangswert entsprach.

Trägt man die Meßwerte der Schmerzschwelle in einem Koordinatensystem gegen die Hauttemperatur auf, so erhält man eine, im Hinblick auf die hohe Variabilität der Meßwerte, erstaunlich exakte lineare Beziehung zwischen Hauttemperatur und Höhe der Schmerzschwelle, die allerdings, da sie nur auf drei Meßwerten beruht, zur statistischen Absicherung weiterer Meßwerte bedürfte (siehe Kurve 5).

Eine Durchsicht der Literatur über die Temperaturabhängigkeit von Schmerzschwellenbestimmungen ist wenig ergiebig.

Notermans berichtet bei seinen Untersuchungen der Schmerzschwelle bei elektrischer Reizapplikation von geringen Einflüssen der Hauttemperatur auf die Höhe der Schwelle. Erst bei Abkühlung unter 20° C fand er einen deutlichen Anstieg (42). Ob dieser Anstieg linear verlief oder anderen Gesetzmäßigkeiten folgte, ist seiner Arbeit nicht zu entnehmen.

Diese Beobachtungen decken sich insofern mit der vorliegenden Untersuchung, als eine statistisch signifikante Erhöhung der Schmerzschwelle auch hier erst bei einer Hauttemperatur unter 20° C nachweisbar war.

Die Erhöhung der Schmerzschwelle, d.h. die spätere Wahrnehmung normalerweise bereits deutlich schmerzhafter Druckwerte, muß an sich keine negative Beeinflussung der Fahrtechnik des Skiläufers zur Folge haben, da die Dynamik der zur Schwungeinleitung und -steuerung nötigen Hoch-Tief-Bewegung dadurch nicht eingeschränkt wird.

Da allerdings durch die Änderung der Hauttemperatur nicht nur die Schwelle für Schmerz, sondern auch für andere Hautsinne wie die Druckwahrnehmung verändert wird (59), die gerade beim Skilauf durch die Registrierung der Druckschwankungen zwischen Stiefelschaft und Unterschenkel möglicherweise eine wichtige Rolle als Feed-back-Kontrolle der Vorlagestellung des Unterschenkels spielt, könnte dadurch die Fahrsicherheit beeinträchtigt und damit die Verletzungsgefahr erhöht werden. Dies um so mehr, weil bei derart tiefen Temperaturen, wie sie zu einer deutlichen Erhöhung der Schmerzschwelle nötig sind, die Abkühlung nicht nur die Hautoberfläche, sondern auch tiefere Gewebsschichten wie Muskulatur, Sehnen und Bänder betrifft, wodurch deren Belastbarkeit eingeschränkt und die Gefahr einer Verletzung bei Stürzen zusätzlich erhöht wird.

Schließlich führt eine so große Abkühlung selbst zu einer so starken Kälteschmerzempfindung, daß dadurch neben dem Fahrvergnügen auch die Konzentration des Fahrers leidet, und damit die Unfallgefahr durch unangepaßtes Fahrverhalten steigt.

Aus diesen Gründen ist für die Verletzungsprävention im Skisport eine gute Kälteisolierung der Skistiefel sicherlich von großer Bedeutung und sollte bei der Erstellung von Konstruktionsrichtlinien für Skistiefel Beachtung finden.

11.5. Größe der Auflagefläche

Um mögliche Einflüsse der Fläche der Druckeinwirkung auf die Höhe der Schmerzschwelle zu überprüfen, wurden die Meßwerte bei Stempelflächen von 1 cm² bzw. 2 cm² Größe mittels des T-Tests für abhängige Stichproben miteinander verglichen.

Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0.01 ergab sich ein signifikanter Unterschied der Schwellenhöhe bei verschiedenen großen Stempelflächen.

Bei Verdoppelung der Fläche von ein auf zwei qcm erhöhte sich die Schmerzschwelle um durchschnittlich 40%.

Dieses Ergebnis läßt darauf schließen, daß eine räumliche Summation für den Druckschmerz nicht existiert, daß also eine Zunahme der Zahl der erregten Schmerzrezeptoren nicht zu einer Zunahme der Schmerzempfindung und damit zu einer Erniedrigung der Schmerzschwelle führt.

Hardy, Wolff und Goodell, die diese Frage schon 1940 mittels Reizung durch Hitzestrahlung untersuchten, konnten für den Schmerzsinne ebenfalls keine räumlichen Summationsprozesse feststellen. Der Temperatur-

sinn hingegen zeigte bei ihren Experimenten eine deutliche Zunahme der Empfindungsstärke bei Vergrößerung des stimulierten Hautareals (30).

Die Beobachtung, daß die vorliegenden Ergebnisse statt einer Erniedrigung der Schmerzschwelle bei Vergrößerung der Stempelfläche eine statistisch signifikante Zunahme zeigen, dürfte damit zu begründen sein, daß bei einer größeren Stempelfläche höhere Druckwerte nötig sind, um das Gewebe so weit zu komprimieren, daß schmerzhaft Werte entstehen, als bei kleineren Stempelflächen, wobei die Anzahl der erregten Endorgane des Schmerzsinn keine wesentliche Rolle spielt.

Für die Skistiefelkonstruktion ist daraus die Konsequenz zu ziehen, daß für eine möglichst großflächige Druckverteilung entlang des gesamten, vom Stiefelschaft umschlossenen Unterschenkels zu sorgen ist, und Knickstellen im Schaftmaterial, die zu eng umschriebenen Bereichen mit lokalen Druckspitzen bei der Vorlagebewegung führen können, wie sie in der Arbeit von P.Schaff beschrieben sind (50), vermieden werden sollten.

11.6. Unterschiedsschwellen

Unter Verwendung des Ein-Stichproben-T-Tests für Korrelationskoeffizienten wurden bei acht von zehn Versuchspersonen hochsignifikante Werte für eine lineare Abhängigkeit der Unterschiedsschwellengröße von der Höhe der Ausgangsdruckintensität im Sinne des Weber-Fechner'schen Gesetzes gefunden (s. 10.3.8).

Dies zeigt nochmals, daß sowohl das verwendete Meßsystem als auch die Versuchsmethodik nicht nur hinsichtlich der Bestimmung von Absolutschwellen, sondern auch von Unterschiedsschwellen anderen psychophysikalischen Meßmethoden durchaus gleichwertig sind.

Die Kenntnis der Unterschiedsschwellen für Druck ist deshalb von Bedeutung, weil möglicherweise über die Druckrezeptoren am Unterschenkel eine feed-back-Kontrolle der Unterschenkelbewegung stattfindet. Unterschreitet der Druck zwischen Stiefelschaft und Unterschenkel den Wert der Unterschiedsschwellen, wird die unbewußte Kontrolle des Bewegungsablaufs erschwert und möglicherweise die Fahrsicherheit beeinträchtigt.

11.7. Verwendbarkeit der Meßergebnisse für Anforderungen an die Stiefelkonstruktion

Die für die Druckschmerzempfindlichkeit am Unterschenkel ermittelten Durchschnittswerte von 31 N/qcm bei den Männern und 23 N/cm² bei den Frauen liegen im Bereich der Druckwerte, die P.Schaff in seiner Arbeit über die Druckverteilung im Stiefelschaft als Spitzenwerte zwischen Unterschenkel und Stiefel, nämlich 20 - 30 N/cm², erhalten hatte (50).

Auf Grund der hohen, für psychophysikalische Untersuchungen jedoch nicht ungewöhnlichen Streuung der Schmerzschwellenwerte von 9,3 bis 50,9 N/cm² müßte eine Obergrenze der im Stiefelschaft erlaubten Druckwerte, die einen hinreichend großen Teil der Skifahrer berücksichtigt, sehr niedrig angesetzt werden. Ein 2s-Intervall, bei dem 95% der im Skisport hauptsächlich aktiven Altersgruppe der 20-40-Jährigen mit der Schmerzschwelle unterhalb der festgesetzten Obergrenze liegen würden, hätte beispielsweise im Stiefelschaft erlaubte Druckmaxima von etwa 3 N/cm² bei den Frauen und etwa 10 N/cm² bei den Männern zur Folge.

Derart niedrige Werte wären zum Einen schon konstruktionstechnisch kaum zu verwirklichen und zum Anderen fahrtechnisch nicht sinnvoll, da damit die bei Vorlagebewegungen erlaubten Maximaldruckwerte im Stiefel größenordnungsmäßig der Höhe der Unterschiedsschwellen für Druck am Unterschenkel (0,5-5 N/cm²) entsprechen, ja sie teilweise sogar unterschreiten würden. Dies hätte zur Folge, daß der Skiläufer der Rückkopplungskontrolle seiner Unterschenkelbewegungen über die Druckrezeptoren der Haut zumindest teilweise beraubt würde, das Gefühl des festen Haltes im Stiefel verlieren und dadurch in seiner Fahrsicherheit beeinträchtigt würde.

Bei etwa der Hälfte der Probanden ist die Druckschmerzschwelle so niedrig, daß sie, nach den von Schaff gemessenen Druckwerten, schon bei geringer Vorlagestellung Schmerzen verspüren würden.

Dies führt zur Frage der Übertragbarkeit der im Labor gemessenen Werte für die Druckschmerzschwellen auf die Verhältnisse während des Fahrens auf der Piste.

Der gravierendste Unterschied besteht in der Geschwindigkeit des Druckanstiegs. Während bei den Labormessungen der bewegliche Schlitten mit einer konstanten Geschwindigkeit von 60 mm/min nach oben gefahren wurde, was, je nach Schmerzempfindlichkeit, zu einer Zeitspanne von durchschnittlich 20 - 30 Sekunden bis zum Erreichen der Schwelle führte, wobei - wie aus Abbildung 3 u. 4 ersichtlich - aus technischen Gründen zwar die Geschwindigkeit des Schlittens konstant gehalten werden konnte, nicht jedoch die der Druckzunahme, steigt der Druck bei Vorlagebewegungen im Stiefel auf der Piste in Zeiträumen von Zehntelsekunden an und fällt ebenso schnell wieder ab.

Eine derartige Situation kann unter Laborbedingungen kaum simuliert werden, da die Reaktionszeit der Probanden zu lang ist, um bei so hohen Druckanstiegsgeschwindigkeiten den Punkt des Übergangs von

Druck zu Schmerz rechtzeitig angeben zu können. Daher ist anzunehmen, daß die Schmerzschwelle unter Fahrbedingungen höher ist als auf Grund der im Labor gemessenen Werte zu erwarten wäre.

Hinzu kommt die völlig andere Gesamtsituation auf der Piste gegenüber Laborbedingungen. Während sich die Versuchspersonen bei den Messungen völlig auf die Druckeinwirkung auf den Unterschenkel konzentrierten, und Rahmenbedingungen geschaffen wurden, die äußere Einflüsse möglichst minimieren sollten, sind Skiläufer einem erheblich umfangreicheren sensorischen und sensiblen Input ausgesetzt.

Neben multiplen tactilen, thermischen, visuellen und akustischen Informationen, die zu gleicher Zeit zentral verarbeitet werden müssen, der Konzentration auf Pistenbeschaffenheit und der Aufmerksamkeit gegenüber den Vorgängen in der Umwelt des Skiläufers, ist auch, zumindest bei geübteren Läufern, das Fahrvergnügen dazu angetan, den auf den Unterschenkel einwirkenden Druck auf einen geringen Anteil im Gesamtspektrum der vom Skisportler wahrgenommenen Einflußgrößen zu beschränken, was sicherlich zusätzlich dazu führt, daß die Schmerzschwelle höher anzusetzen ist, als im Labor gemessen.

Wenn diese Tatsachen, zusammen mit der hohen Variabilität der Meßwerte, ihre Verwendbarkeit für Konstruktionsrichtlinien auch relativieren, so lassen sich aus den in 11.2 - 11.4 diskutierten Ergebnissen doch einige wichtige Forderungen an eine den physiologischen Ansprüchen gerechter werdende Stiefelkonstruktion stellen.

12. Zusammenfassung

1. Mit einer für diesen Zweck neu konstruierten Versuchsapparatur wurden bei 30 Versuchspersonen beiderlei Geschlechts (15/15) an jeweils 14 Meßpunkten die Höhe und die Verteilung der Druckschmerzschwellen an der Vorderseite des distalen Unterschenkels untersucht.
2. Die Schwelle für Druckschmerz am Unterschenkel lag in der Männergruppe im Mittel bei 31 N/cm^2 , in der Frauengruppe bei etwa 23 N/cm^2 . Der Unterschied zwischen beiden Gruppen war statistisch signifikant ($p=0,05$).
3. Signifikante Unterschiede in der Verteilung der Schmerzempfindlichkeit entlang des Unterschenkels konnten nicht festgestellt werden.
4. Die Streuung der Schwellenbestimmungen ist erheblich. Sie liegt jedoch im Rahmen der Meßergebnisse vergleichbarer psychophysikalischer Untersuchungsmethoden.
5. Abkühlung der Hautoberfläche führt zu einer Anhebung der Schmerzschwelle. Signifikante Werte erhält man allerdings erst bei Abkühlung um 10°C und mehr.
6. Bei Verdoppelung der den Druck übertragenden Fläche stieg die Schmerzschwelle signifikant ($p=0,01$) um etwa 40 % an.
7. Die im Labor gemessenen Werte sind auf Grund der besonderen Umweltsituation, die die Ergebnisse psychophysikalischer Schmerzmessungen nicht unerheblich beeinflussen kann, nur bedingt auf andere Umweltverhältnisse übertragbar.
8. Auf Grund der hohen Streuung der Meßwerte läßt sich die angestrebte Obergrenze für die bei Vorlagebewegungen auftretenden Druckwerte zwischen Skistiefelschaft und Unterschenkel für ein hinreichend großes Konfidenzintervall nicht festlegen.

9. Anforderungen, die sich aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit für die Konstruktion von Skistiefeln ziehen lassen, sind :
- Für eine ausreichende Kälteisolierung der Stiefel muß gesorgt werden, um der durch Veränderung der Hautsensibilität einerseits und durch die Kälteeinwirkung an sich andererseits entstehenden Verminderung der Fahrsicherheit vorzubeugen.
 - Der Stiefelschaft sollte so konstruiert sein, daß bei Vorlagebewegungen eine möglichst homogene Druckverteilung entlang des gesamten Schaftes erfolgt, und lokale Druckspitzen vermieden werden, die auf Grund der erhöhten Schmerzempfindlichkeit bei eng umschriebener Druckeinwirkung eine sekundäre Einschränkung der Vorlagebewegung und damit ein erhöhtes Sturzrisiko zur Folge haben könnten.
 - Eine Klassifizierung der Stiefel in eher für männliche und eher für weibliche Skiläufer geeignete Typen sollte erfolgen. Die Stiefel für die weiblichen Skifahrer sollten eine bessere Polsterung und geringere Druckwerte zwischen Schaft und Unterschenkel aufweisen, um der niedrigeren Schmerzschwelle der Frauen zu genügen.
 - Im Bereich des Ristes sollten niedrige Druckwerte angestrebt werden, um Schäden im Sinne von Tendovaginitiden durch Druckreize, die für die akute Schmerzwahrnehmung zwar unterschwellig, durch die ständig wiederkehrende Einwirkung jedoch chronisch schädigend sind, zu vermeiden.

13. Anhang

13.1. Tabellen

Tabelle 1 :
Gesamtergebnisse Männer

Name männl.	$\bar{x}$ Sehnenber.	$\bar{x}$ Tibia	$\bar{x}$ Muskulatur	$\bar{x}$ total	s
R. W.	28,7	25,5	22,4	25,3	11,1
C. B.	18,3	22,5	14,7	18,5	4,6
T. E.	17,1	17,5	21,4	18,8	5,1
M. B.	20,7	19,2	20,1	20,0	3,3
A. T.	16,9	21,1	21,7	20,1	4,0
W. A.	24,1	16,5	25,0	21,7	6,2
P. F.	34,0	29,5	26,6	29,7	6,1
B. S.	45,1	25,0	27,5	31,6	11,6
H-P. F.	32,2	27,2	33,5	30,9	7,3
A. E.	37,7	35,6	31,3	34,7	5,5
H. H.	59,1	27,8	28,7	37,1	17,1
E. R.	44,4	45,9	36,5	42,1	6,9
B. K.	60,5	43,2	36,1	45,6	13,2
W. H.	53,9	28,3	71,2	50,9	22,6
K. G.	38,4	41,2	47,2	42,5	11,0
$\bar{x}$	35,4	28,4	31,0	31,3	
s	14,9	9,3	13,7	10,7	
v	0,42	0,33	0,44	0,34	

Tabelle 2 :
Gesamtergebnisse Frauen

Name weibl.	Sehnen- bereich	Tibia	Musku- latur	$\bar{x}$ total	s
U.L.	8,5	8,9	10,8	9,3	2,6
M.D.	23,0	17,1	8,9	15,9	6,5
J.A.	40,6	27,6	35,1	34,0	9,2
K.S.	16,8	17,3	22,0	18,8	4,5
J.P.	17,9	32,0	34,8	29,0	9,3
M.B.	14,7	16,7	18,8	16,9	4,4
S.G.	15,0	12,4	17,0	14,8	5,3
S.S.	32,1	37,4	35,8	35,3	4,0
H.M.	25,5	27,5	33,3	29,0	6,8
M.F.	34,7	38,1	24,7	32,4	7,6
B.K.	9,5	11,7	9,5	10,3	1,6
U.H.	12,3	28,5	30,6	24,6	9,4
S.B.	35,8	24,3	26,6	28,4	6,8
A.P.	25,8	14,6	15,2	18,0	6,2
B.D.	20,8	18,8	32,7	24,3	7,5
$\bar{x}$	22,2	21,8	23,7	22,7	
s	10,0	8,7	9,9	9,7	
v	0,45	0,40	0,42	0,42	

Alle Meßergebnisse in N/cm²

Tabelle 3:
Meßwerte Männer
Gesamtübersicht

MP	R.W.	C.B.	T.E.	M.B.	A.T.	W.A.	P.F.	B.S.	HP.F.	A.E.	H.H.	E.R.	B.K.	W.H.	K.G.	$\bar{x}$	s	v
1	41,8	15,4	10,3	21,8	12,9	27,4	23,8	33,3	16,9	38,2	44,9	43,7	58,1	48,0	36,4	31,5	14,5	0,46
2	28,5	16,7	15,0	21,3	18,5	11,0	26,5	57,6	30,8	38,0	74,3	47,1	69,0	46,9	22,2	34,9	20,0	0,57
3	29,3	19,9	19,4	22,7	13,9	29,0	43,9	50,3	44,4	38,6	61,7	52,4	70,3	61,7	48,4	40,4	17,5	0,43
4	15,0	21,0	23,7	16,8	22,1	28,9	41,8	39,1	36,7	35,9	55,6	34,5	44,4	58,9	46,4	34,7	13,5	0,39
5	11,5	21,0	25,3	20,9	25,9	20,8	32,4	28,9	29,0	28,5	39,2	49,8	47,7	39,5	23,0	29,6	10,6	0,36
6	26,8	25,7	19,3	23,6	18,1	18,6	33,3	25,0	28,7	34,2	32,4	45,7	30,9	41,8	47,0	30,1	9,2	0,31
7	27,6	21,9	11,6	10,8	16,1	12,8	26,9	16,2	28,2	47,4	25,1	49,3	44,8	23,1	54,8	27,8	14,6	0,53
8	37,5	27,7	14,9	21,6	23,4	15,8	27,0	27,1	21,8	30,6	23,3	37,5	36,7	16,5	45,2	27,1	9,0	0,33
9	24,0	16,0	16,6	19,2	22,0	14,6	27,8	27,8	28,2	37,2	19,8	47,4	55,9	20,6	35,8	27,5	12,0	0,43
10	14,8	20,1	25,6	22,3	17,9	23,7	25,6	28,2	32,4	32,1	42,0	37,6	41,1	68,6	34,4	31,1	13,2	0,43
11	15,5	13,9	16,1	19,7	25,3	22,7	27,4	25,3	43,5	36,0	35,1	37,8	32,4	70,2	43,2	30,9	14,5	0,47
12	45,8	13,0	17,4	17,1	22,9	25,9	27,0	26,6	33,6	34,4	24,2	40,8	40,8	99,4	49,2	34,5	20,9	0,61
13	10,5	6,0	22,7	21,7	19,9	27,1	26,4	35,5	27,2	25,9	23,4	37,6	33,2	67,7	60,4	29,7	16,3	0,55
14	25,3	20,4	25,3	19,8	22,7	25,4	26,4	22,1	30,8	28,2	18,9	28,5	33,1	50,2	48,6	28,4	9,4	0,33
$\bar{x}$	25,3	18,5	18,8	20,0	20,1	21,7	29,7	31,6	30,9	34,7	37,1	42,1	45,6	50,9	42,5	31,3	10,6	0,34
s	11,0	5,5	5,1	3,3	4,0	6,2	6,1	11,1	7,3	5,5	17,0	6,9	13,2	22,6	11,0			
v	0,44	0,30	0,27	0,17	0,20	0,28	0,21	0,35	0,24	0,16	0,46	0,16	0,29	0,44	0,26			

Tabelle 4:
Meßwerte Frauen
Gesamtübersicht

MP	U.L.	J.A.	M.D.	K.S.	J.P.	M.B.	S.G.	S.S.	H.M.	M.F.	B.K.	U.H.	S.B.	A.P.	B.D.	$\bar{x}$	s	v
1	7,0	35,4	21,2	15,6	18,4	8,8	8,0	35,7	11,3	26,6	8,6	10,9	28,7	25,2	13,1	18,3	9,9	0,54
2	9,2	54,0	21,6	21,7	21,2	16,3	9,2	29,9	30,1	35,7	8,0	11,3	44,9	30,1	15,9	23,9	13,6	0,57
3	8,9	43,1	27,1	15,1	16,3	18,0	15,6	27,8	31,2	39,6	10,6	12,9	37,1	26,9	29,7	24,0	10,9	0,46
4	8,9	30,0	22,2	14,7	15,8	16,3	27,0	35,2	29,2	37,0	10,8	14,1	32,4	21,0	24,6	22,6	9,0	0,40
5	11,8	31,5	12,6	11,9	21,6	11,2	15,5	36,8	28,7	27,6	11,4	19,5	29,2	19,6	20,2	20,6	8,4	0,41
6	8,9	33,0	20,3	17,0	25,9	16,5	10,9	45,9	26,8	39,1	11,3	31,0	22,1	15,3	16,2	22,7	10,8	0,48
7	6,9	36,1	18,4	20,8	37,7	14,4	11,4	31,9	25,4	52,9	14,1	28,8	23,6	14,7	20,1	23,8	12,1	0,51
8	9,5	17,1	19,1	23,9	45,8	16,7	10,9	36,3	24,0	43,8	11,5	29,8	22,1	14,4	20,2	23,0	11,4	0,49
9	7,5	20,3	15,1	13,0	29,0	24,5	13,3	36,3	32,4	27,1	10,0	33,3	24,4	9,0	17,3	20,8	9,5	0,46
10	11,2	38,7	4,1	23,1	28,8	19,5	19,1	41,6	43,0	23,4	8,5	36,5	29,0	8,8	33,2	24,6	12,7	0,52
11	8,4	38,9	9,4	21,0	26,3	14,6	21,1	40,3	30,0	25,3	9,7	37,5	30,3	14,5	34,2	24,1	11,1	0,46
12	5,8	38,4	10,1	23,6	35,0	19,2	14,3	30,3	32,1	22,1	9,8	25,0	28,4	15,2	31,7	22,7	10,1	0,44
13	12,8	31,7	12,2	26,0	41,4	24,6	19,3	30,3	33,2	25,0	8,8	30,2	28,1	18,6	33,2	25,0	9,1	0,36
14	13,6	27,7	8,8	16,2	42,7	16,0	11,3	36,5	28,3	27,8	10,5	23,9	17,4	18,8	31,2	22,1	10,1	0,46
$\bar{x}$	9,3	34,0	15,9	18,8	29,0	16,9	14,8	35,3	29,0	32,4	10,3	24,6	28,4	18,0	24,3	22,7	8,2	0,36
s	2,3	9,2	6,5	4,6	10,1	4,3	5,3	5,2	6,8	9,6	1,6	9,4	6,8	6,2	7,6	1,8		
v	0,31	0,27	0,41	0,24	0,35	0,26	0,36	0,15	0,23	0,23	0,16	0,38	0,24	0,35	0,31	0,08		

Alle Meßwerte in N/cm²

Tabelle 5 :
Follow up - Messung
nach vier Monaten

MP	A.T.				H.H.				A.E.				J.P.				M.F.			
	M1	M2	d%	M2/M1	M1	M2	d%	M2/M1	M1	M2	d%	M2/M1	M1	M2	d%	M2/M1	M1	M2	d%	M2/M1
1	12,9	26,9	+ 109	2,08	44,9	30,7	-32	0,68	38,2	32,1	-16	0,84	18,4	34,7	+89	1,89	26,6	38,1	+43	1,43
2	18,5	35,8	+94	1,94	74,3	42,1	-43	0,57	38,0	29,4	-23	0,77	21,2	28,6	+35	1,35	35,7	49,9	+40	1,40
3	13,9	38,7	+178	2,78	61,7	53,3	-14	0,86	38,6	30,7	-21	0,80	16,3	37,1	+128	2,28	39,6	37,3	-6	0,94
4	22,1	31,0	+40	1,40	55,6	39,8	-28	0,72	35,9	32,9	-8	0,92	15,8	35,6	+125	2,25	37,0	43,3	+17	1,17
5	25,9	20,7	-20	0,80	39,2	16,5	-58	0,42	28,5	29,1	+2	1,02	21,6	38,2	+77	1,77	27,6	45,5	+65	1,65
6	18,1	28,9	+60	1,60	32,4	25,5	-21	0,79	34,2	34,8	+2	1,02	25,9	50,4	+95	1,95	39,1	48,6	+24	1,24
7	16,1	21,8	+35	1,35	25,1	28,2	+12	1,12	47,4	35,5	-25	0,75	37,7	40,8	+8	1,08	52,9	41,2	-22	0,78
8	23,4	21,0	-10	0,90	23,3	36,7	+58	1,58	30,6	18,7	-39	0,61	45,8	36,9	-19	0,81	43,8	46,1	+5	1,05
9	22,0	32,7	+49	1,49	19,8	21,9	+11	1,11	37,2	25,4	-32	0,68	29,0	50,1	+73	1,73	27,1	42,7	+58	1,58
10	17,9	33,2	+86	1,85	42,0	38,5	-8	0,92	32,1	30,8	-4	0,96	28,8	37,9	+32	1,32	23,4	37,6	+61	1,61
11	25,3	29,0	+15	1,15	35,1	32,9	-6	0,94	36,0	20,4	-43	0,57	26,3	31,4	+19	1,19	25,3	34,8	+38	1,38
12	22,9	24,3	+6	1,06	25,2	43,3	+72	1,72	34,4	17,2	-50	0,50	35,0	38,6	+10	1,10	22,1	29,7	+34	1,34
13	19,9	26,5	+33	1,33	23,4	38,8	+66	1,66	25,9	29,5	+14	1,14	41,4	29,2	-30	0,71	25,0	40,5	+62	1,62
14	22,7	27,7	+22	1,22	18,9	26,1	+38	1,38	28,2	30,7	+9	1,09	42,7	32,5	-24	0,76	27,8	35,1	+26	1,26
$\bar{x}$	20,1	28,4			37,1	33,9			34,7	28,4			29,0	37,3			32,4	40,7		
s	4,0	5,5			17,0	9,8			5,5	5,8			10,1	6,6			9,6	5,7		
v	0,20	0,19			0,46	0,29			0,16	0,20			0,35	0,18			0,23	0,14		

Tabelle 6 :
Schwellenwerte bei Abkühlung der Haut

Name männl.	Meßpunkt	28	14	21	28
P.R.	6	36,6	70,3	51,5	29,7
	11	65,9	58,6	66,4	70,2
A.T.	6	24,5	74,5	53,2	39,7
	11	32,7	60,8	41,9	28,1
P.F.	6	38,3	35,8	33,3	29,4
	11	20,2	47,4	36,5	25,7
Name weibl.					
A.T.	6	31,5	56,4	40,5	25,4
	11	30,0	63,7	47,1	38,3
B.D.	6	18,2	51,3	44,4	21,1
	11	27,8	60,7	42,9	25,6
A.P.	6	23,9	42,2	28,4	20,9
	11	14,7	50,9	34,3	28,8
$\bar{x}$	-	30,4	56,1	43,4	31,9
s	-	13,3	11,2	10,3	13,4
v	-	0,44	0,20	0,24	0,42

Alle Meßwerte in N/cm²

Tabelle 7 :
Vergleich verschiedener
Stempelflächen

Versuchs- person	Meßpunkt	Fläche 10x10mm	Fläche 12x17mm	Diff.
P.R.	6	28,0	35,4	+ 7,4
	12	37,5	48,4	+ 10,9
H.H.	6	28,3	45,7	+ 17,4
	12	31,3	48,7	+ 17,4
A.T.	6	25,5	26,4	+ 0,9
	12	30,9	50,2	+ 19,3
R.M.	6	22,0	30,8	+ 8,8
	12	20,2	31,8	+ 11,6
A.R.	6	9,5	14,5	+ 5,0
	12	29,0	31,7	+ 2,7
$\bar{x}$		26,2	36,4	+ 10,2
s		7,6	11,7	+ 6,4
v		0,29	0,33	

Alle Meßwerte in N/cm²

Tabelle 8 :
Vergleich der ermittelten Schmerzschwellen
bei Benutzung von Prüfmaschine bzw. Ring-
kraftmesser

Name	Prüfma- schine	Ring- kraftm.	Untersch.
A.W.	27,3	20,8	- 6,5
	29,6	23,6	- 6,0
C.H.	22,0	22,6	+ 0,6
	26,3	21,3	- 5,0
E.R.	39,3	25,0	-14,7
	41,4	25,1	-16,3
S.G.	23,1	18,8	- 2,3
	18,2	26,2	+ 8,0
J.P.	38,6	24,4	-14,2
	50,4	34,7	-15,7
M.F.	45,5	29,7	-15,8
	48,4	30,7	-17,7
P.R.	47,1	33,8	-13,3
	46,6	49,0	+ 2,4
H.G.	32,8	18,3	-14,5
	41,0	24,3	-16,7
H.T.	40,6	27,5	-13,1
	35,1	27,9	- 7,2
$\bar{x}$	36,3	26,9	- 9,3
s	9,9	7,2	7,6
v	0,27	0,27	

Alle Meßwerte in N/cm²

13.2. Literaturverzeichnis

LITERATURVERZEICHNIS

(1) Asang, E.

The Work of the IAS in Skiing Safety
in : Skiing Trauma and Safety : Fifth international Symposium,
Ed : Johnson, R.J./Mote, C.D.
Baltimore 1985

(2) Ascherl, R. et al

A ten-Year-Survey of Skiing Injuries
Ski Trauma and Safety IV
München 1982

(3) Bär, W.

Skischuh (Alpin und Langlauf) und Kopfschutz
in : Med. Probleme des Skisports,
Hrg : Jäger, M.
München 1984

(4) Biener

Skisportunfälle - Epidemiologie und Prävention
in : Medizinische Probleme des Skisports, Hrg. M. Jäger
München 1984

(5) Campbell, R.J. et al

High-risk Injury Groups in downhill skiing
Ski Trauma and Safety III
München 1981

(6) Chapman, W.P./Jones, C.M.

Variations in Cutaneous and Visceral Pain Sensitivity in Normal Subjects
J Clin Invest 23 (1944)

(7) Cornsweet, T.N.

The Staircase Method in Psychophysics
Am J Psych 75 (1962)

(8) Crane, H.D. et al

The Influence of Equipment and Ski Factors on Ski Injuries with an Update-13year`s-Study
Ski Trauma and Safety III
München 1981

(9) Della Corte, M.

A Study on the Cutaneous Pricking Pain Threshold in Normal Man
Archivio di Fisiologia 64 (1965)

(10) DIN-Norm

DIN 7880 Teil 1, 09.77

Skischuhe für Skibindungen im alpinen Skilauf

Anschlußbereich am Skischuh ab Gr. 36 für den Pistenlauf (1977)

(11) Edmeads, J.

The Physiology of Pain : A Review

Prog. Neuro-Psychopharmacol & Biol. Psychiat. 7 (1983)

(12) Ekcland, A.

Injuries to advanced and expert Skiers During Summer Skiing

Ski Trauma and Safety III

München 1981

(13) Fagius, J./Wahren, L.K.

Variability of Sensory Threshold Determination in Clinical Use

J Neur Sci 51 (1981)

(14) Frick, H./Leonhardt, H./Starck, D.

Allgemeine Anatomie. Spezielle Anatomie I.

Stuttgart 1980

(15) v. Frey, M.

Beiträge zur Physiologie des Schmerzsinnes. Die Gefühle und ihr Verhältnis zu den Empfindungen.

Ber. Verhandl. Königl. Sächs. Gesells. Wissensch. Z. Leipzig,

Math.-Phys. Kl. 46 (1894)

(16) Ganong, W.F.

Lehrbuch der medizinischen Physiologie

Heidelberg 1979

(17) Geldard, F.A.

The Human Senses

New York 1972

(18) Gelehrter, G. / Zotter, K.

Zur Epidemiologie des alpinen Skisports in Österreich

MSchr. Unfallheilk. : H. Unfallheilk. 130 (1978)

(19) Gescheider, G.A.

Psychophysics, Method and Theory

Hillsdale, New Jersey 1976

(20) Goldberg, J.M. Standardised Method of Determining Vibratory Perception Thresholds for Diagnosis and Screening in Neurological Investigation

J Neurol Neurosurg Psych 42 (1979)

(21) Goldscheider, A.

Über den Schmerz in klinischer und physiologischer Hinsicht
Berlin 1894

(22) v. Graffenried, B.

The Influence of Anxiety and Pain Sensitivity on experimental Pain in Man
Pain 4 (1978)

(23) Grünewald, C.

Schmerzmessung. Ein Vergleich von Meßmethoden
Inaug. Dissertation, Ludwig-Maximilian-Universität München
München 1985

(24) Hall, K.R.L.

Studies of Cutaneous Pain: A Survey of Research since 1940
Brit J Psych 44 (1953)

(25) Hassler, R.

Afferente Systeme
in: Schmerz. Grundlagen, Pharmakologie, Therapie
Hrg.: Janzen, R.
Stuttgart 1972

(26) Hauser, W./Asang, E./Schaff, P.

Influence of Ski Boot Design on Skiing Safety and Skiing Performance
Skiing Trauma and Safety: Fifth Int. Symposium
Eds.: Johnson, R.J./Mote, C.D.
Philadelphia 1985

(27) Hauser, W. / Gläser, H.

Alpine Skiunfälle und Verletzungen
München 1985

(28) Hauser, W.

Die Belastungsfähigkeit des menschlichen Beines und die daraus sich ergebenden Forderungen an die
Funktionseinheit Skischuh-Bindung
Vortrag in St. Christoph am 20. 3. 1984

(29) Hauser, W./Asang, E./Müller, B.

Injury Risk in Alpine Skiing
in : Skiing Trauma and Safety: Fifth Int. Symposium
Eds : Johnson, R.J. / Mote, C.D.
Philadelphia 1985

(30) Hardy, J.P./Wolff, H.G./Goodell, H.

Studies on Pain. A New Method for Measuring Pain Threshold : Observations on Spatial Summation of
Pain
J Clin Invest 19 (1940)

(31) Hensel, H.

Allgemeine Sinnesphysiologie. Hautsinne, Geschmack, Geruch.
Berlin 1966

(32) Hensel, H.

Schmerz und der Begriff der Spezifität
in: Schmerz. Grundlagen, Pharmakologie, Therapie
Hrg.: Janzen, R.
Stuttgart 1972

(33) Hewel, Th. / Lange, J. / Maurer, P.C. / Everts, C.

Alpiner Skisport und Unfall
Fortschr. Med. 100 (1982)

(34) IAS

IAS-Richtlinie Nr. 150 Skischuhe für Erwachsene ab Gr. 36, Anforderungen und Prüfungen
Verlag des TÜV Bayern e. V., München 1980

(35) Keele, K.D.

Pain Sensitivity Tests. The Pressure Algometer
Lancet (1954)

(36) Johnson, R.J./Pope, M.H./Ettlinger, C.F.

The Interrelationship between Ski Accidents, the resultant Injury, the Skier's Characteristics, and the Ski-Boot-Binding System
Ort Cl No Am 7 (1976)

(37) Keidel, W.D.

Zum Problem der "subjektiven" und "objektiven" Quantifizierung des Schmerzes
in: Schmerz. Grundlagen, Pharmakologie, Therapie
Hrg.: Janzen, R.
Stuttgart 1972

(38) Korbelt, P.J. / Zelcher, J.

A controlled Study of Skiing Injuries in Australia
in: Ski Trauma and Safety IV
München 1982

(39) Lanier, L.H.

Variability in the Pain Threshold
Science 97 (1943)

(40) Larbig, W.

Schmerz. Grundlagen - Forschung - Therapie
Stuttgart 1982

(41) Notermans, S.L.H.

Die Algesimetrie und ihre klinische Anwendung
in: Schmerz, Grundlagen, Pharmakologie, Therapie
Hrg.: Janzen, R.
Stuttgart 1972

(42) Notermans, S.L.H.

Measurement of the pain threshold determined by electrical stimulation and its clinical application
Neurology, 16 (1966)

(43) Medoff, H. et al.

Design Criteria for Alpine Ski Boots
Journal of Biomechanics 1981

(44) Melzack, R.

The Perception of Pain
Scientific American 204 (1961)

(45) Menke, W./Müller, E.H.

Typische Skiverletzungen und deren Ursachen
Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 4 (1981)

(46) Merskey, H./Spear, F.G.

The Reliability of the Pressure Algometer
Brit. J. Soc. Clin. Psych. 3 (1964)

(47) Pelner, L.

The Determination of Sensitivity to Pain
Journal of Lab and Clin Med (1941)

(48) Ramm, B./Hofmann, G.

Biomathematik
Stuttgart, 1987

(49) Runzheimer, J./Wilhelm, K.

Die Bedeutung des Skischuhes beim Skiunfall
Sportarzt und Sportmedizin (1978)

(50) Schaff, P.

Untersuchungen über die Skischuhgestaltung und deren Einfluß auf die Belastung des menschlichen Beines
Inaug. Dissertation TU München
München 1984

(51) Schaff, P./Schattner, R./Hauser, W.

Biomechanical Enquiries on Ski Boots and Resulting Practical Requirements
in: Skiing Trauma and Safety, ASTM Publication
Ed.: Johnson, R.J./Mote, C.D.
Philadelphia 1987

- (52) Schmidt, R.F.
Möglichkeiten und Grenzen der Hautsinne
Klin. Wschr. 49 (1971)
- (53) Schmidt, R.F.
Grundriß der Sinnesphysiologie
Heidelberg 1980
- (54) Schmidt, R.F./Thews, G.
Physiologie des Menschen
Heidelberg 1980
- (55) Sherman, E.D.
Sensitivity to Pain
Can. M. A. J. 48 (1943)
- (56) Sobotta, J./Becher, H. Atlas der Anatomie des Menschen, 1. Teil
München, Berlin 1957
- (57) Steiness, I.
Vibratory Perception in Normal Subjects
Acta Medica Scandinavica 158 (1957)
- (58) Sternbach, R.A.
Psychophysiology of Pain
Int. J. Psychiatry in Medicine 6 (1975)
- (59) Stevens, J.C.
Thermo-tactile Interactions. Some Influences of Temperature on Touch
In: Sensory Functions of the Skin in Humans
Ed.: Kenshalo, D.R.
New York, London 1979
- (60) Struppler, A.
Entstehung und Kontrolle des Schmerzes
Med. Klin. 75 (1980)
- (61) Struppler, A.
Zentralnervöse Verarbeitung und efferente Beeinflussung des Schmerzes
in: Schmerz. Grundlagen, Pharmakologie, Therapie
Hrg.: Janzen, R.
Stuttgart 1972
- (62) Suckert, K./Benedetto, K.P./Vogel, A.
Entwicklung der Achillessehnenruptur im Skisport
Akt. Traumatol 13 (1983)

(63) **Werner, J.**
Medizinische Statistik
München 1984

(64) **Wolff, B.B.**
Die Messung von Schmerz beim Menschen
in : Schmerz
Hrsg.: Keeser, W./Pöppel, E./Mitterhusen, P.
München 1982

(65) **Young, L.R. et al**
The Etiology of Ski Injuries : An eight year Study of the Skier and his Equipment
Ort Cl No Am 7 (1976)

(66) **Zimmermann, M.**
Neurophysiologische Mechanismen von Schmerz und Schmerztherapie
in : Schmerz
Hrsg. Keeser, W./Pöppel, E./Mitterhusen, P. München 1982

(67) **Zimmermann, M.**
Neurobiological Concepts of Pain, its Assessment and Therapy
in: Pain Measurement in Man. Neurophysiological Correlates of Pain
ed: **B. Bromm**,
Amsterdam 1984

Ich danke allen, die zum Zustandekommen der vorliegenden Arbeit beitrugen. Mein besonderer Dank gilt dabei:

Herrn Prof. Dr. med. B. Rosemeyer	für die Überlassung des Themas, die freundliche Betreuung und die Möglichkeit der Versuchsdurchführung im Labor für Biomechanik der orthopädischen Klinik
Herrn Dr. med. P. Schaff	für die fortwährende, fachlich fundierte und geduldige Betreuung
Herrn Dr. med. W. Hauser	für die engagierte Unterstützung und Beratung
Herrn Dr. Ing. W. Plitz	für die freundliche Unterstützung bei der Entwicklung des Versuchsaufbaus
Herrn Dr. R. Schattner	für die Unterstützung und Beratung bei der Textverarbeitung
Herrn Dr. H.-R. Mannhaupt	
Herrn Dr. Ing. F. Velho	
Fr. G. Gall	

Finanziell unterstützt wurde diese Untersuchung vom Deutschen Skiverband (DSV), der Stiftung Sicherheit im Skisport (SIS) und dem internationalen Arbeitskreis Sicherheit beim Skilauf (IAS) unter Mitwirkung des Technischen Überwachungs-Vereins Bayern.

Nicht zuletzt gilt mein Dank allen Versuchspersonen, deren verständnisvolles Entgegenkommen diese Arbeit erst ermöglichte.

LEBENS LAUF

09.04.1961	geboren in Hof/Saale als einziger Sohn des Rechtsanwalts Dr. jur. Gustav Ruckdeschel und seiner Frau Betty, geb. Bergmann
1967 - 1971	Besuch der Grundschule
1971 - 1980	Besuch des Jean Paul-Gymnasiums in Hof
1980 - 1986	Studium der Humanmedizin an der Ludwig- Maximilian-Universität in München
November 1986	Approbation als Arzt
seit Februar 1987	Grundwehrdienst als Truppenarzt in Northeim a. Harz

